



COMUNE DI PORTOMAGGIORE

PROVINCIA DI
FERRARA



REGIONE EMILIA
ROMAGNA



REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA RTN DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 kW

Denominazione Impianto:

“PORTOMAGGIORE”

Ubicazione:

PORTOMAGGIORE (FE)
Via Portoni Bandissolo, snc

ELABORATO
023000

Cod. Doc.: PTM-023000-R

RELAZIONE TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO

Sviluppatore:



GRUPPO GEO S.R.L.

Viale F. Cavallotti
63822 Porto San Giorgio (FM)
ITALY
P.IVA 02572290449

Scala:

Data:
18/08/2025

PROGETTO

PRELIMINARE



DEFINITIVO



AS BUILT



Richiedente:

LIO ENERGY LEPUS S.R.L.

Via Arrigo Boito, 8
20121 Milano (MI)
ITALY
P.IVA 14219600963

Tecnici e Professionisti:



Revisione	Data	Descrizione	Redatto	Approvato	Autorizzato
01	18/08/2025	PROGETTO DEFINITIVO	N.V.	N.V.	N.V.
02	23/12/2025	REVISIONE	ATs – G. Fiorese	ATs – M. Capria	ATs – G. Gulinelli
03					
04					

Il Tecnico:
Dott. Ing. Guelfo Gulinelli



Il Richiedente:

LIO ENERGY LEPUS S.R.L.
(Il legale rappresentante Luca Raineri)

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 2 di 44

SOMMARIO

1. PREMESSA	3
1.1 LOCALIZZAZIONE E INQUADRAMENTO DELL'OPERA	3
2. RIFERIMENTI NORMATIVI	6
3. LIMITI DI COMPATIBILITA' ELETTROMAGNETICA.....	7
5. SORGENTI A BASSA FREQUENZA (ELF)	8
6. CAMPO ELETTRICO.....	9
7. CAMPO MAGNETICO	9
7.1 CAMPO FOTOVOLTAICO	10
7.2 ELETTRODOTTI INTERRATI BT DA INVERTER DI STRINGA A POWER STATION	10
7.3 POWER STATION	13
CABINA AT	13
CABINA BT	15
7.4 CABINE DI CONSEGNA	17
7.5 CABINA DI PARALLELO	19
7.6 ELETTRODOTTI INTERRATI AT 36KV INTERNI ALL'IMPIANTO	21
7.7 ELETTRODOTTO DI CONNESSIONE AT 36 KV DA AREA D'IMPIANTO A SE	26
GIUNTI.	28
8. CONCLUSIONI	29
9. ALLEGATI	31
9.1 DOCUMENTO DI VALIDAZIONE – ALGORITMI DI CALCOLO DEL SOFTWARE MAGIC® (MAGNETIC INDUCTION CALCULATION).....	31

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 3 di 44

1. PREMESSA

Il presente documento è parte della documentazione relativa al progetto per la costruzione e l'esercizio di un Impianto Agrivoltaico Avanzato conforme alle vigenti prescrizioni di legge con potenza di picco pari a **18.030,60 kW** da realizzare nel **Comune di Portomaggiore (FE)**.

La connessione alla rete elettrica nazionale AT ha ottenuto una soluzione tecnica da parte del Gestore Terna S.p.A. di cui al codice pratica **202402306**.

La presente relazione si pone l'obiettivo di descrivere le emissioni elettromagnetiche generate dal regolare funzionamento degli impianti e dalla relativa connessione alla Rete di Trasmissione Nazionale (RTN), al fine di determinare le DPA (Distanze di Prima Approssimazione).

1.1 LOCALIZZAZIONE E INQUADRAMENTO DELL'OPERA

Le aree di progetto dell'impianto agrivoltaico facente parte dell'intervento di cui al presente documento è ubicata nel territorio della Regione Emilia Romagna, Provincia di Ferrara, Comune di Portomaggiore, in Via Portoni Bandissolo. Le aree di progetto sono caratterizzate da campi agricoli a seminativi. Non vi sono nuclei abitati nei dintorni tranne che qualche casa sparsa. I centri abitati più vicini sono Portoverrara e Pioppara. Il sito è a circa 1,7 km a nord dal centro del Comune di Portomaggiore. La maggiore via di comunicazione prossima all'aree di progetto è Via Portoni Bandissolo. Nelle illustrazioni che seguono sono rappresentati gli inquadramenti foto-cartografici dell'area di intervento su varie basi di sovrapposizione e a varie scale di riproduzione con l'introduzione di elementi tematici significativi.

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 4 di 44



Figura 1.1: Corografia aree impianto FV su foto satellitare (scala 1:20.000)

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO Elettromagnetico	Pagina 5 di 44

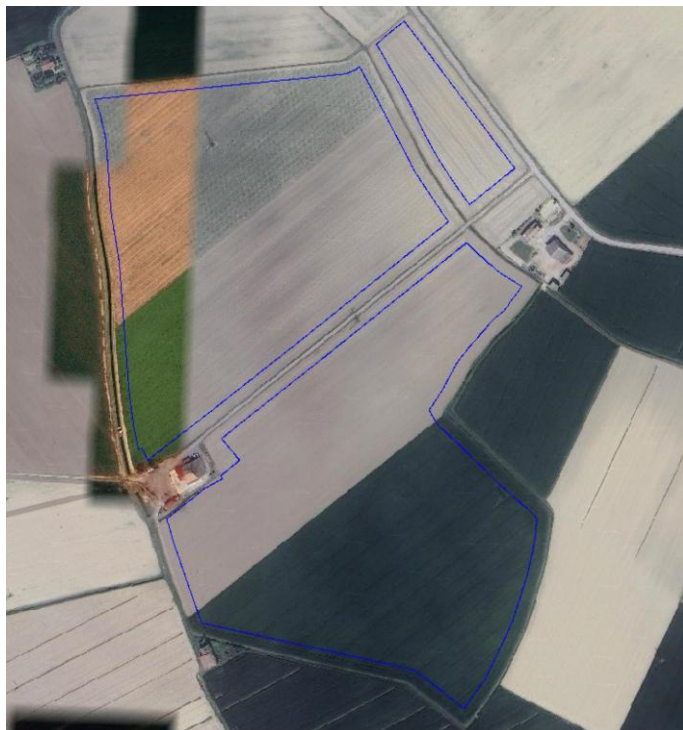


Figura 1.2: Inquadramento aree impianto FV su foto satellitare (scala 1:1.000)

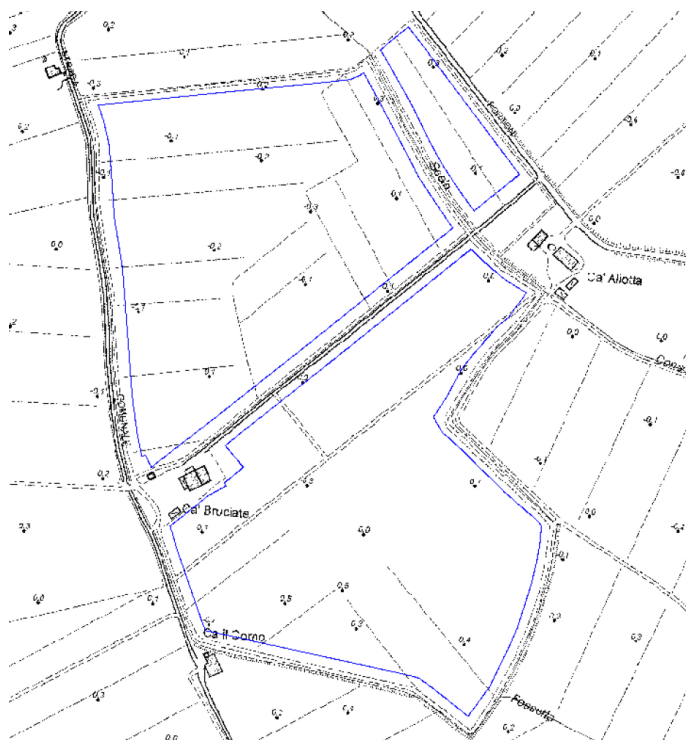


Figura 1.3: Inquadramento aree impianto FV su CTR 5k (scala 1:1.000)

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 6 di 44

2. RIFERIMENTI NORMATIVI

Le norme costituenti il quadro normativo vigente in materia di inquinamento elettromagnetico derivante da impianti di trasmissione, trasformazione e distribuzione di energia elettrica a frequenza industriale (50 Hz) sono:

Legge 22 febbraio 2001, n° 36	Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici
Decreto del Presidente del Consiglio dei ministri del 08.07.2003	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 (50 Hz) generati dagli elettrodotti
Decreto ministeriale 29.05.2008	Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti

Trovano inoltre applicazione ai fini della presente valutazione le seguenti norme tecniche:

CEI 106-11	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 (2006-02)
CEI 211-4	Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee e da stazioni elettriche (2008-09)
CEI 211-6	Guida per la misura e la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz - 10 kHz, con riferimento all'esposizione umana (2001-01)
ENEL DISTRIBUZIONE	Linea Guida per l'applicazione del § 5.1.3 dell'allegato al DM 29.05.08 - Distanza di prima approssimazione (DPA) da linee e cabine elettriche
CEI 11-17	Impianti di produzione, trasmissione e distribuzione pubblica di energia elettrica - Linee in cavo

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 7 di 44

3. LIMITI DI COMPATIBILITA' ELETTROMAGNETICA

Il panorama normativo italiano in fatto di protezione contro l'esposizione dei campi elettromagnetici si riferisce alla legge 22/2/01 n°36 che è la legge quadro sulla protezione dalle esposizioni ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici completata a regime con l'emanazione del D.P.C.M. 8.7.2003.

Nel 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 (50 Hz) generati dagli elettrodotti", vengono fissati i limiti di esposizione e i valori di attenzione, per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) connessi al funzionamento e all'esercizio degli elettrodotti.

In particolare, negli articoli 3 e 4 vengono indicate le seguenti 3 soglie di rispetto per l'induzione magnetica:

- "Nel caso di esposizione a campi elettrici e magnetici alla frequenza di 50 Hz generati da elettrodotti non deve essere superato il limite di esposizione di 100 μ T per l'induzione magnetica e 5kV/m per il campo elettrico intesi come valori efficaci" [art. 3, comma 1];
- "A titolo di misura di cautela per la protezione da possibili effetti a lungo termine, eventualmente connessi con l'esposizione ai campi magnetici generati alla frequenza di rete (50 Hz), nelle aree gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere, si assume per l'induzione magnetica il valore di attenzione di 10 μ T, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio." [art. 3, comma 2];
- "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, è fissato l'obiettivo di qualità di 3 μ T per il valore dell'induzione magnetica, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio". [art.4]


Nel dettaglio, si riportano le seguenti tabelle con le definizioni ed i limiti di esposizione per basse frequenze:

Limite di esposizione	Valore che non deve essere superato in alcuna condizione di esposizione della popolazione
Limite di attenzione	Valore che non deve essere superato negli ambienti a permanenza prolungata
Obiettivi di qualità	Limite da rispettare per installazioni future

Tabella 3.1: Glossario limiti di esposizione ai campi elettromagnetici

DPCM 8 luglio 2003 – Basse frequenza (< 100 kHz)		
	Campo elettrico	Induzione magnetica
Limite di esposizione	5000 V/m	100 μ T
Valore di attenzione (media 24 h)	-	10 μ T
Obiettivi di qualità (media 24 h)	-	3 μ T

Tabella 3.2: Limiti di esposizione alle basse frequenze

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 8 di 44

Il valore di attenzione si riferisce ai luoghi tutelati esistenti nei pressi di elettrodotti esistenti; l'obiettivo di qualità si riferisce, invece, alla progettazione di nuovi elettrodotti in prossimità di luoghi tutelati esistenti o alla progettazione di nuovi luoghi tutelati nei pressi di elettrodotti esistenti. Il DPCM 8 luglio 2003, all'art. 6, in attuazione della Legge 36/01 (art. 4 c. 1 lettera h), introduce la metodologia di calcolo delle fasce di rispetto, definita nell'allegato al Decreto 29 maggio 2008 (Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti). Detta fascia comprende tutti i punti nei quali, in normali condizioni di esercizio, il valore di induzione magnetica può essere maggiore o uguale all'obiettivo di qualità.

La metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti prevede una procedura semplificata di valutazione (par. 5.1.3 del Decreto 29 maggio 2008) con l'introduzione della Distanza di Prima Approssimazione (DPA), nel rispetto dell'**obiettivo di qualità di 3 μ T (microTesla)** del campo magnetico.

Le definizioni di DPA e Fascia di rispetto sono, infatti, così definite:

- **Distanza di prima approssimazione (DPA)**: per le linee è la distanza, in pianta sul livello del suolo, dalla proiezione del centro linea che garantisce che ogni punto la cui proiezione al suolo disti dalla proiezione del centro linea più di DPA si trovi all'esterno delle fasce di rispetto; e per le cabine è la distanza, in pianta sul livello del suolo, da tutte le pareti della cabina stessa che garantisce i requisiti di cui sopra;
- **Fascia di rispetto**: spazio circostante un elettrodotto che comprende tutti i punti, al di sopra e al di sotto del livello del suolo, caratterizzati da una induzione magnetica di intensità maggiore o uguale all'obiettivo di qualità (3 μ T).

5. SORGENTI A BASSA FREQUENZA (ELF)

Le basse frequenze, o ELF (Extremely Low Frequency), consistono in campi elettrici e magnetici di che si formano in corrispondenza di elettrodotti (a bassa, media ed alta tensione), e di tutti i dispositivi domestici alimentati a corrente elettrica, di intensità decisamente inferiore, quali elettrodomestici, videotermini, etc.

Gli altri componenti del sistema di trasmissione e distribuzione che sono diffusi sul territorio, cioè le stazioni e le cabine, non sono in pratica delle importanti sorgenti di campo elettrico dal punto di vista dell'esposizione della popolazione.

Il campo elettrico generato dalle linee elettriche aeree in un determinato punto dello spazio circostante dipende principalmente dal livello di tensione e dalla distanza del punto dai conduttori della linea (altri fattori che influenzano l'intensità del campo elettrico sono poi la disposizione geometrica dei conduttori nello spazio e la loro distanza reciproca).

Alle basse frequenze le caratteristiche fisiche dei campi sono più simili a quelle dei campi statici rispetto a quelle dei campi elettromagnetici veri e propri; è per questo che per le ELF il campo elettrico e il campo magnetico possono essere considerati e valutati come entità a sé stanti.

Si distinguono due principali tipologie di sorgenti in base alle diverse caratteristiche del campo emesso:

- Quelle deputate al trasporto e distribuzione dell'energia elettrica;
- Quelle degli apparecchi che utilizzano energia elettrica.

Nella situazione in esame si tratta di elettrodotti, cioè, sorgenti di campo elettromagnetico a frequenza industriale (50 – 60 Hz). Per elettrodotto si intende l'insieme delle linee elettriche, delle sottostazioni e delle cabine di trasformazione.

Le cabine di trasformazione rappresentano un problema molto minore dal punto di vista dell'inquinamento elettromagnetico, poiché a pochi metri di distanza i campi elettrici e magnetici sono già trascurabili.

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 9 di 44

Le linee elettriche portano energia elettrica dai centri di produzione agli utilizzatori (industrie, abitazioni, etc.) mentre le cabine di trasformazione trasformano la corrente prodotta dalle centrali in tensioni più basse per l'utilizzazione nelle applicazioni pratiche.

Le tensioni di esercizio delle linee elettriche in Italia si distinguono in 15 kV e 20 kV per la media tensione, 36 kV, 132 kV, 150 kV per l'alta tensione e 220 kV, 380 kV per l'altissima tensione.

6. CAMPO ELETTRICO

Il campo elettrico generato da una apparecchiatura elettrica, o da un elettrodotto, è legato alla tensione del sistema, che almeno nominalmente è fissa, ne risulta che i livelli di campo elettrico sono sostanzialmente stabili.

Per le linee MT-AT realizzate in cavo interrato, la presenza dello schermo metallico all'interno del cavo, connesso a terra alle estremità, permette di confinare il campo elettrico all'interno delle singole anime.

Non si procede perciò al calcolo dei livelli di campo elettrico per i cavidotti interrati.

Inoltre il calcolo del campo elettrico non viene effettuato nemmeno per l'impianto fotovoltaico e per l'impianto BESS, in quanto, per le tensioni in gioco, le sopra citate linee guida ENEL DISTRIBUZIONE (Linea Guida per l'applicazione del § 5.1.3) specificano, a valle di misure effettuate sulle linee elettriche facenti parte della rete Enel, che *"il campo elettrico al suolo in prossimità di elettrodotti a tensione uguale o inferiore a 150 kV non supera mai il limite di esposizione per la popolazione pari a 5 kV/m"*.

Inoltre il limite di esposizione del campo elettrico risulta sempre rispettato all'interno dei confini dell'impianto.

Pertanto, per le motivazioni appena citate, si giustifica lo studio delle emissioni limitate al solo campo magnetico.

7. CAMPO MAGNETICO

Come da premessa, lo scopo della presente relazione è descrivere i campi magnetici generati dai componenti/apparecchi elettrici in progetto al fine di determinare le DPA (Distanze di prima approssimazione).

Componenti/apparecchi elettrici in analisi, in quanto potenziali sorgenti di campo magnetico a bassa frequenza (ELF) sono:

- Campo fotovoltaico (moduli fotovoltaici);
- Elettrodotti interrati (BT) da inverter di stringa a Power Station;
- Power Station, composte rispettivamente da:
 - Cabina prefabbricata in CLS comprensiva dei quadri AT;
 - Cabina prefabbricata in CLS comprensiva di quadri BT di parallelo inverter;
 - Trasformatore con rapporto di trasformazione 36/0,8 kV.
- Cabine di Consegna dotate di quadri AT per raccolta delle linee provenienti dalle Power Station;
- Cabina di parallelo dotata di quadri AT e trasformatore per servizi ausiliari;
- Elettrodotti interrati (AT) 36 kV interni all'impianto;
- Elettrodotto di connessione AT 36 kV da area d'impianto a SE 380/132/36 kV PORTOMAGGIORE.

La modellazione dei campi magnetici è stata effettuata mediante il software MAGIC BeShielding, strumento di calcolo dedicato alla valutazione dei campi elettromagnetici generati da sorgenti a bassa frequenza. Il software consente la simulazione bidimensionale e tridimensionale dei campi magnetici prodotti da linee elettriche e apparecchiature in corrente alternata, tenendo conto delle caratteristiche geometriche, elettriche e installative delle sorgenti, ed è

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 10 di 44

ampiamente utilizzato per analisi di esposizione e verifiche di conformità ai limiti normativi vigenti.

Nel seguito si procede all'analisi puntuale delle apparecchiature individuate quali potenziali sorgenti di campi magnetici.

7.1 CAMPO FOTOVOLTAICO

Il campo fotovoltaico risulta formato dall'insieme delle stringhe di moduli fotovoltaici e dai rispettivi cavi elettrici in c.c. (tipo H1Z2Z2-K ex FG21M21) che conducono all'ingresso degli inverter di campo.

Considerato che:

- Tali sezioni dell'impianto hanno un funzionamento in corrente continua (0 Hz);
- Nel caso di una buona esecuzione delle opere, i cavi con diversa polarizzazione (+ e -) sono posti a contatto, con l'annullamento quasi totale dei campi magnetici statici prodotti in un punto esterno;
- Gli inverter, ovvero le uniche apparecchiature interessate da un valore di corrente significativo, sono molto distanti dai confini dell'impianto;

Si può escludere il superamento dei limiti di riferimento dei valori di campo elettromagnetico.

7.2 ELETTRODOTTI INTERRATI BT DA INVERTER DI STRINGA A POWER STATION

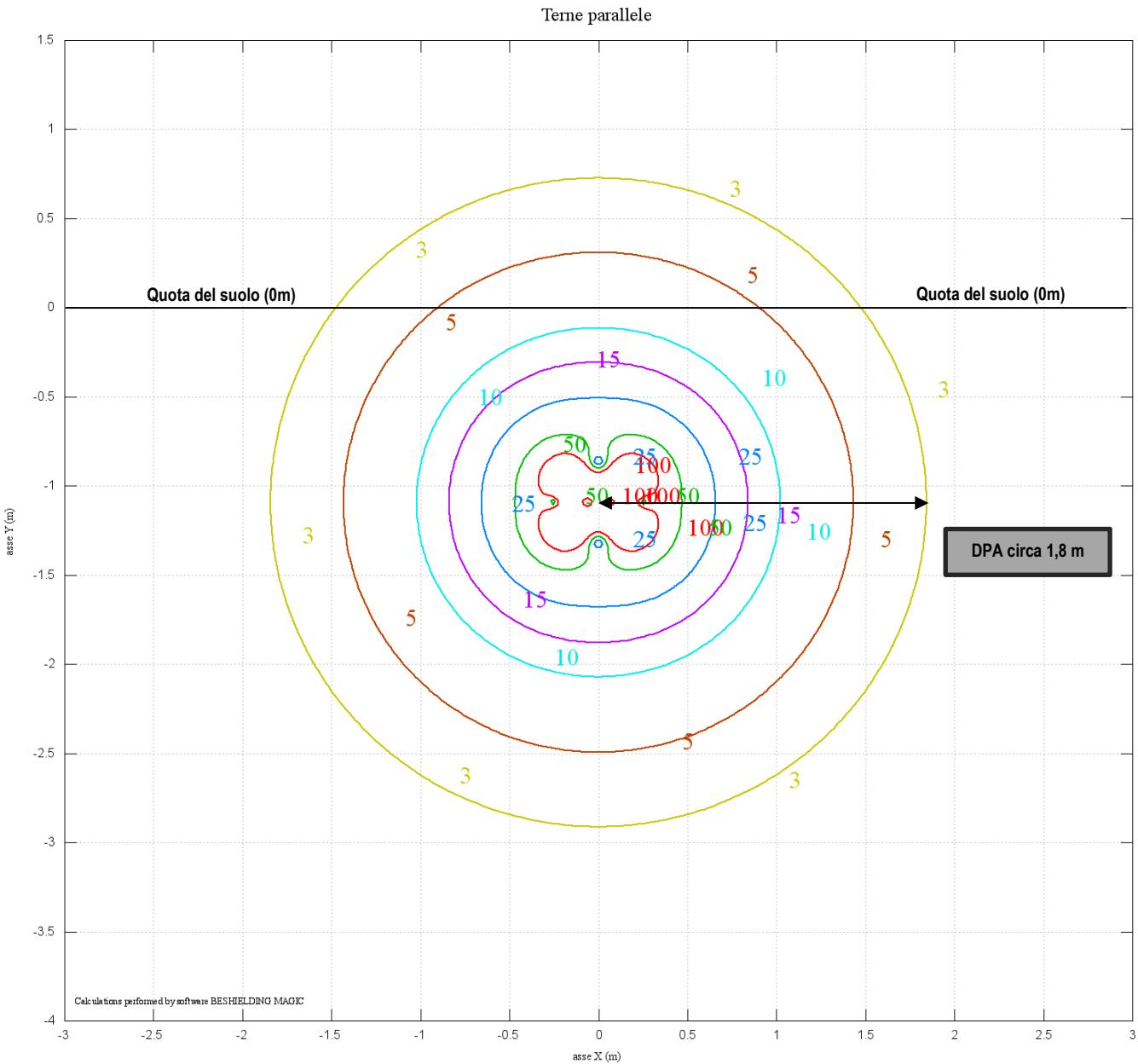
I cavi BT-AC trifase in uscita dagli inverter avranno una tensione pari a 800 V e sezione variabile. Al fine di valutare la DPA è stata ipotizzata una situazione gravosa plausibile, ovvero in cui è presente un parallelismo di un totale di 8 linee BT-AC, disposte in 4 conduit.

E' stato considerato un cavo di tipo FG7(O)R 0,6/1 kV o similare, ed al fine di fornire risultati maggiormente cautelativi per la determinazione delle DPA, verrà assunta come sezione dei cavi 240 mm².

Le linee BT-AC che collegano gli inverter alle Power Station saranno attraversate da una corrente massima di 135 A ed i conduttori di ogni linea disteranno gli uni dagli altri 0,029 m. Si assume una disposizione delle linee trifase all'interno di quattro conduit disposti su due piani paralleli ad una distanza gli uni dagli altri pari a 0,15 m.

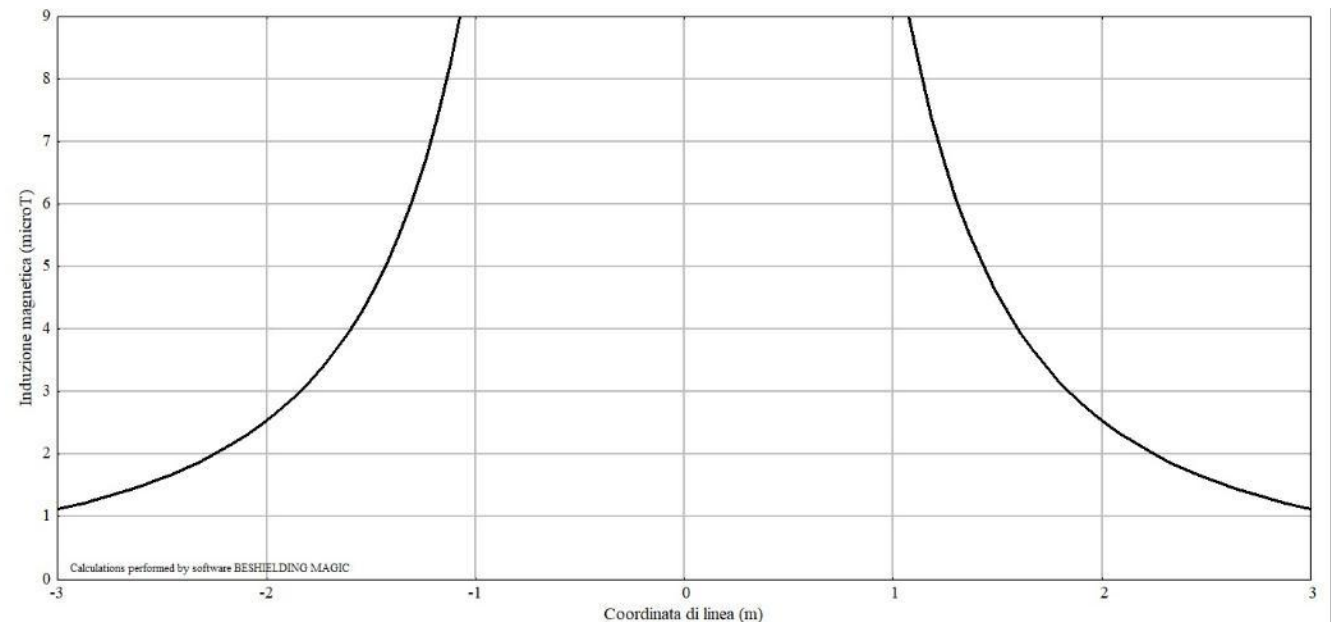
I risultati ottenuti vengono riportati nel seguente grafico rappresentante le curve per fissato valore di induzione elettromagnetica (unità di misura μT).

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 11 di 44



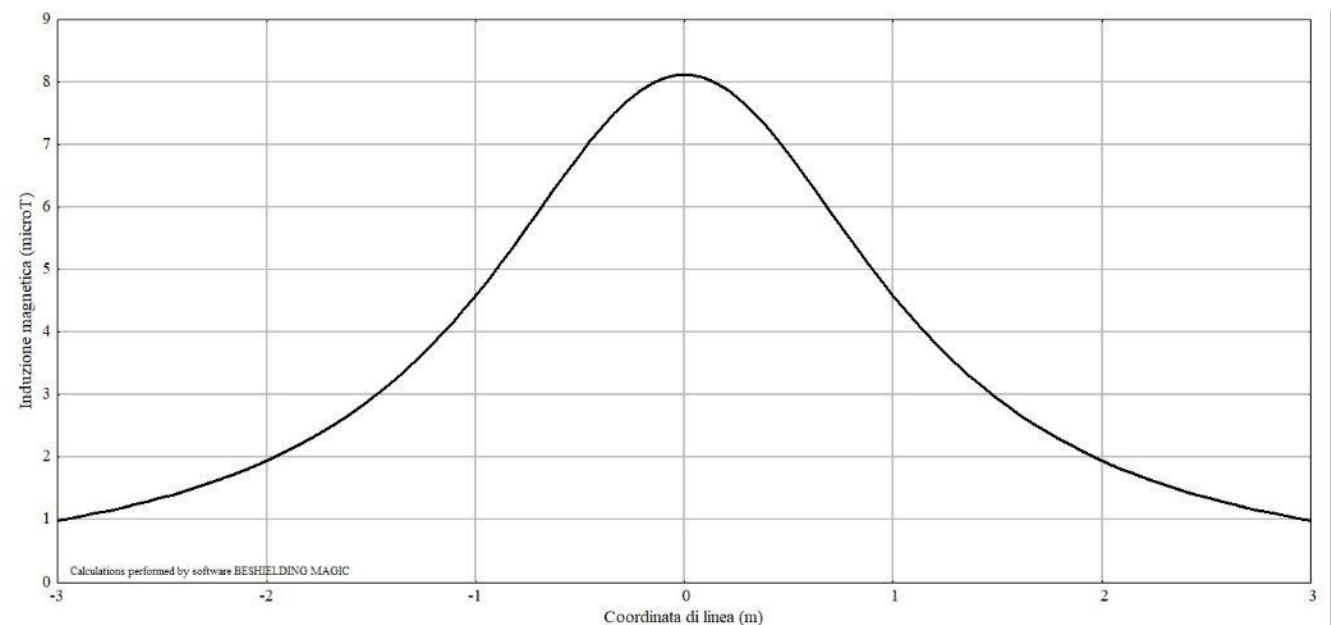
ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 12 di 44

Questi risultati vengono confermati dal seguente grafico, in cui viene riportato l'andamento dell'induzione magnetica ad una quota fissa pari a $-1,1$ m.



Dunque, si considera una DPA pari a 2,0 m rispetto all'asse centrale della sezione, quindi la fascia di rispetto avrà un'ampiezza sul piano complessiva pari a 4,0 m.

Si riporta per completezza anche l'andamento dell'induzione magnetica alla quota 0 m, ovvero a quota terreno/viabilità



ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 13 di 44

7.3 POWER STATION

Le Power Station, costituite da cabina BT e cabina AT, presentano come principali sorgenti di campo magnetico: quadri elettrici di media tensione a 36 kV e di bassa tensione a 0,8 kV, costituite dal trasformatore AT/BT con rapporto di trasformazione 36/0,8 kV.

Si è proceduto quindi alla modellizzazione di tali componenti, di seguito si illustra la disposizione di apparecchiature all'interno delle due cabine.

Si precisa che nel presente studio è stato calcolato separatamente per ciascuna cabina BT e AT della Power Station. L'effetto cumulativo del blocco complessivo, con le due cabine affiancate, non è stato considerato, in quanto la sovrapposizione dei campi risulta sostanzialmente equivalente alla combinazione delle DPA calcolate singolarmente e successivamente sovrapposte, senza differenze significative ai fini della determinazione delle fasce di rispetto.

CABINA AT

Al fine della determinazione dei campi magnetici indotti è stata effettuata la simulazione considerando i seguenti dispositivi situati all'interno della cabina elettrica AT:

- Trasformatore AT/bt;
- Quadri AT;

Di seguito si illustra la disposizione delle apparecchiature all'interno della cabina.

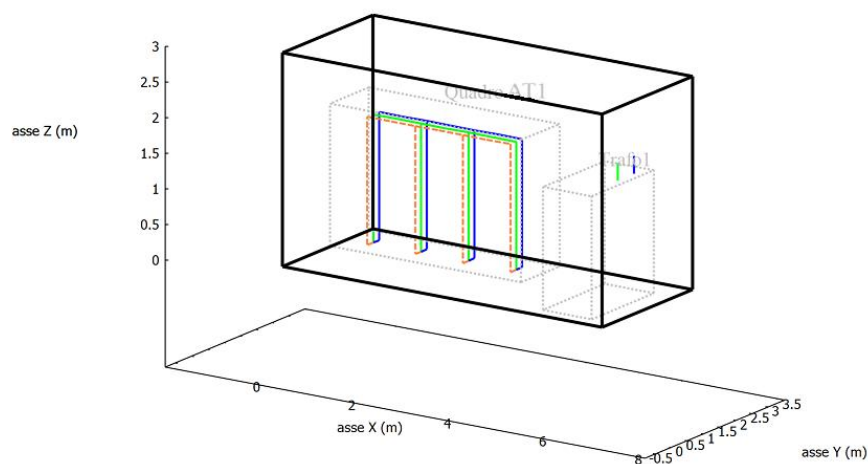
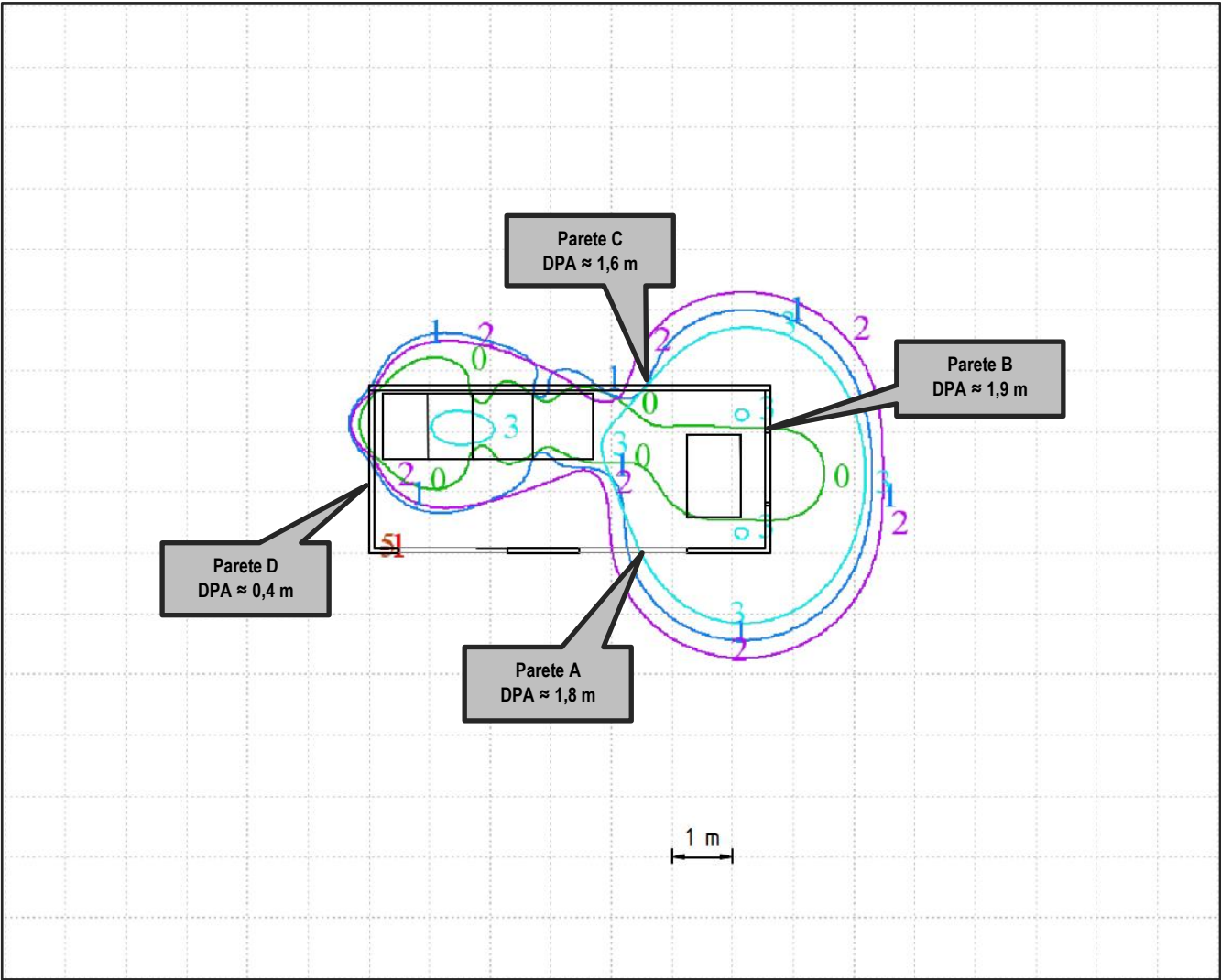







Figura 7.1: Disposizione apparecchiature Power Station – Cabina AT

Si è determinato a diversi valori di quota rispetto al piano di calpestio della cabina stessa (-1m, 0m, 1m, 2m, 3m) l'andamento della curva isometrica per fissato valore di induzione magnetica, pari a $3\mu\text{T}$ (obiettivo di qualità).



LEGENDA	
SIMBOLO	QUOTA RISPETTO AL SUOLO
	z = -1 m
	z = 0 m
	z = 1 m
	z = 2 m
	z = 3 m

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 15 di 44

In base alla configurazione interna delle apparecchiature si possono individuare le DPA rispetto ad ogni direzione, nello specifico, indicando con le lettere A, B, C e D le quattro pareti della cabina, l'induzione magnetica laddove essa supera il valore limite di 3 μ T esternamente alle pareti della cabina stessa:

- DPA rispetto alla parete A pari a circa 1,8 m;
- DPA rispetto alla parete B pari a circa 1,9 m;
- DPA rispetto alla parete C pari a circa 1,6 m;
- DPA rispetto alla parete D pari a circa 0,4 m.

Si stabilisce tuttavia di estendere il valore della DPA più alto a tutte e quattro le pareti della cabina, arrotondando al metro successivo. In conclusione, la Cabina AT delle Power Station avrà una DPA di 2,0 m, da considerarsi dal filo esterno delle pareti della cabina.

CABINA BT

Analogamente per la cabina BT relativa alla Power Station è stata effettuata la simulazione considerando i seguenti dispositivi:

- Quadro BT;

Di seguito si illustra la disposizione delle apparecchiature all'interno della cabina.

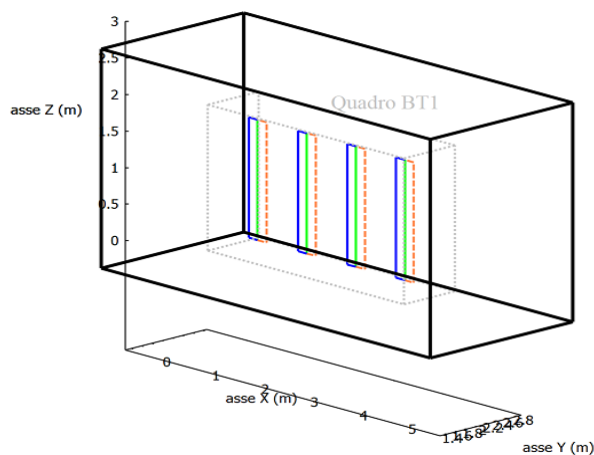
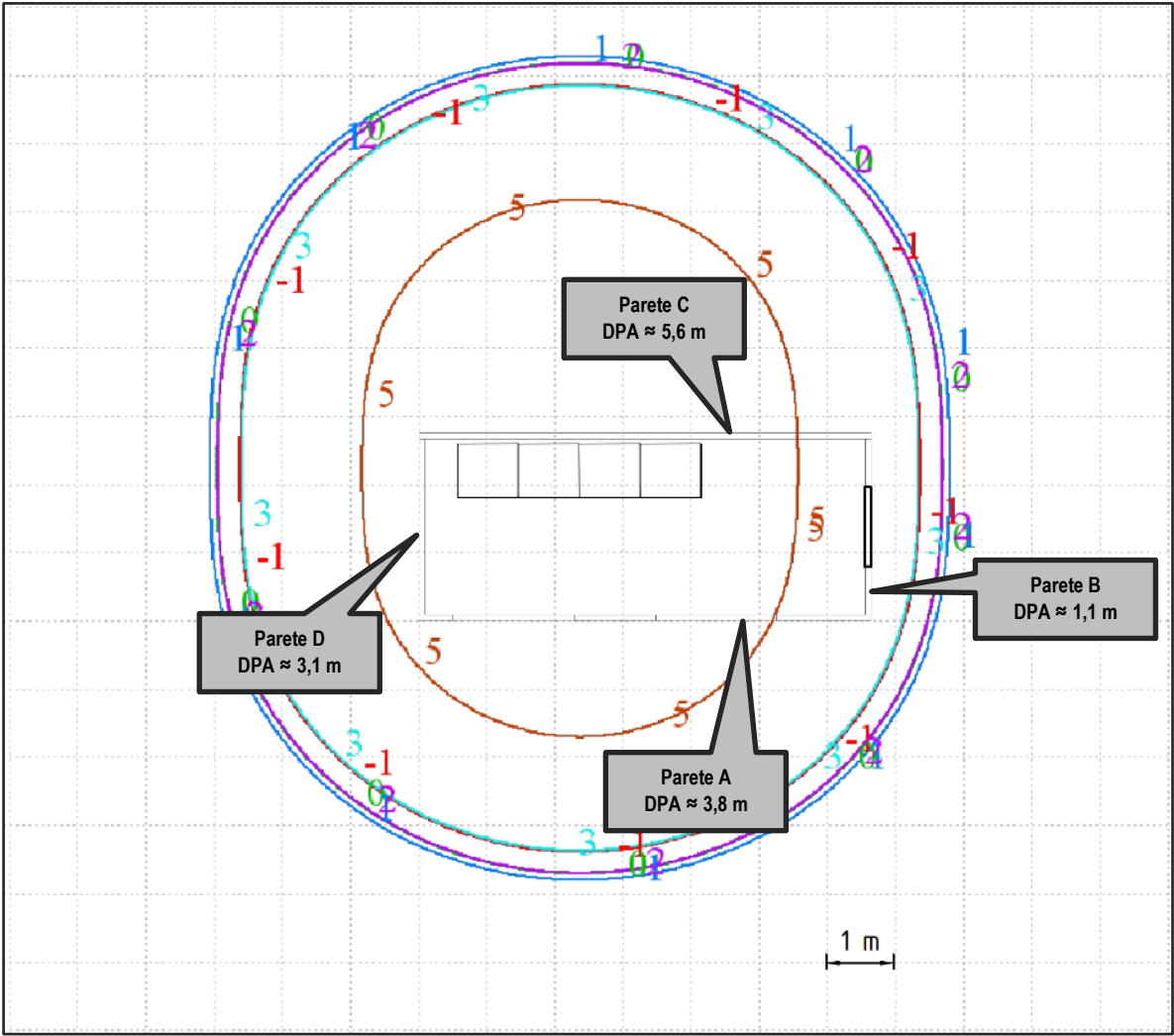


Figura 7.2: Disposizione apparecchiature Power Station – Cabina BT

Si rappresenta a diversi valori di quota rispetto al piano di calpestio della cabina stessa (-1m, 0m, 1m, 2m, 3m, 5m) l'andamento della curva isometrica per fissato valore di induzione magnetica, pari a 3 μ T (obiettivo di qualità).



LEGENDA	
SIMBOLO	QUOTA RISPETTO AL SUOLO
<div></div>	z = -1 m
<div></div>	z = 0 m
<div></div>	z = 1 m
<div></div>	z = 2 m
<div></div>	z = 3 m
<div></div>	z = 5 m

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 17 di 44

In base alla configurazione interna delle apparecchiature si possono individuare le DPA rispetto ad ogni direzione, nello specifico, indicando con le lettere A, B, C e D le quattro pareti della cabina, l'induzione magnetica laddove essa supera il valore limite di 3 μ T esternamente alle pareti della cabina stessa:

- DPA rispetto alla parete A pari a circa 3,8 m;
- DPA rispetto alla parete B pari a circa 1,1 m;
- DPA rispetto alla parete C pari a circa 5,6 m;
- DPA rispetto alla parete D pari a circa 3,1 m.

Si stabilisce tuttavia di estendere il valore della DPA più alto a tutte e quattro le pareti della cabina, arrotondando al metro successivo. In conclusione, la Cabina BT delle Power Station avrà una DPA di 6,0 m, da considerarsi dal filo esterno delle pareti della cabina.

7.4 CABINE DI CONSEGNA

Al fine della determinazione dei campi magnetici indotti è stata effettuata la simulazione considerando i seguenti dispositivi situati all'interno delle cabine di consegna:

- Quadri AT;

Di seguito si illustra la disposizione delle apparecchiature all'interno della cabina.

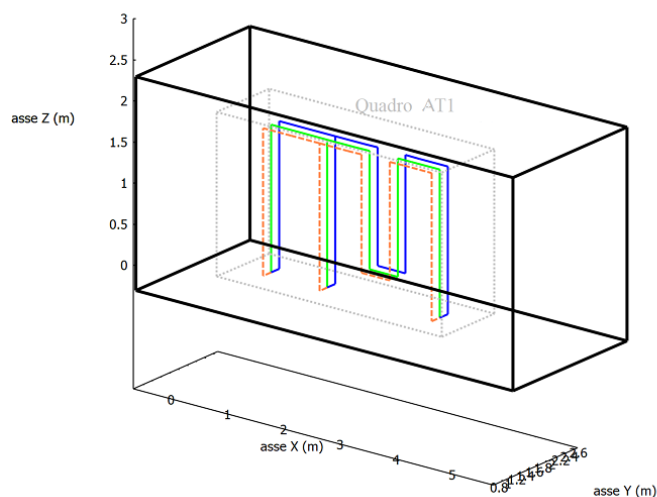
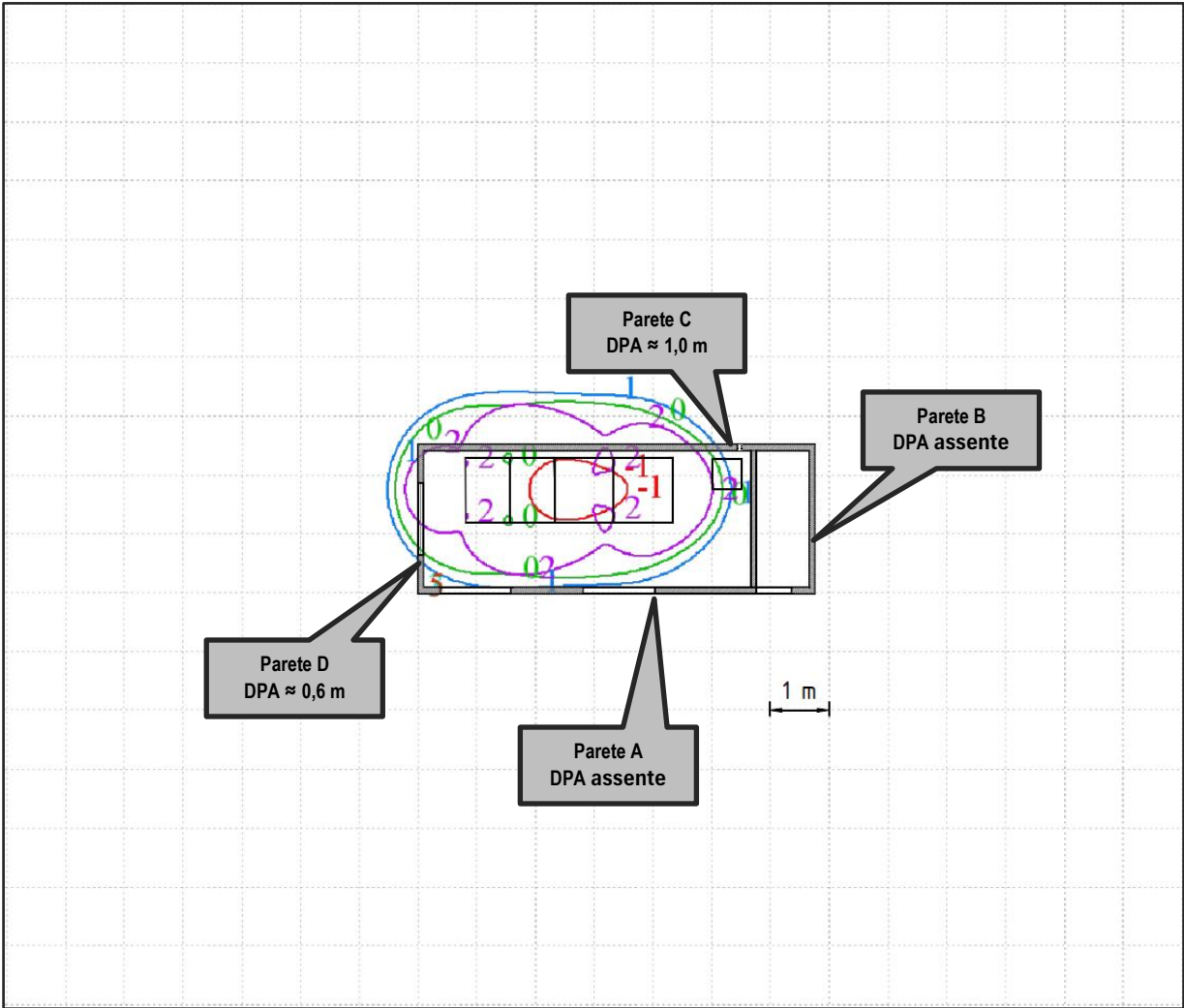




Figura 7.3: Disposizione apparecchiature Cabina di Consegna

Si rappresenta a diversi valori di quota rispetto al piano di calpestio della cabina stessa (-1m, 0m, 1m, 2m, 3m, 5m) l'andamento della curva isometrica per fissato valore di induzione magnetica, pari a 3 μ T (obiettivo di qualità).

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 18 di 44



LEGENDA	
SIMBOLO	QUOTA RISPETTO AL SUOLO
	$z = -1$ m
	$z = 0$ m
	$z = 1$ m
	$z = 2$ m
	$z = 3$ m
	$z = 5$ m

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 19 di 44

In base alla configurazione interna delle apparecchiature si possono individuare le DPA rispetto ad ogni direzione, nello specifico, indicando con le lettere A, B, C e D le quattro pareti della cabina, l'induzione magnetica laddove essa supera il valore limite di 3 μ T esternamente alle pareti della cabina stessa:

- DPA rispetto alla parete A assente;
- DPA rispetto alla parete B assente;
- DPA rispetto alla parete C pari a circa 1,0 m;
- DPA rispetto alla parete D pari a circa 0,6 m.

Si stabilisce di estendere il valore della DPA più alto a tutte e quattro le pareti della cabina. Le Cabine di Consegna avranno una DPA di 1,0 m, da considerarsi dal filo esterno delle pareti della cabina.

7.5 CABINA DI PARALLELO

Al fine della determinazione dei campi magnetici indotti è stata effettuata la simulazione considerando i seguenti dispositivi situati all'interno della cabina di parallelo:

- Quadri AT;
- Quadri BT;
- Trasformatore 36/0,4 kV 160kVA per servizi ausiliari.

Di seguito si illustra la disposizione delle apparecchiature all'interno della cabina.

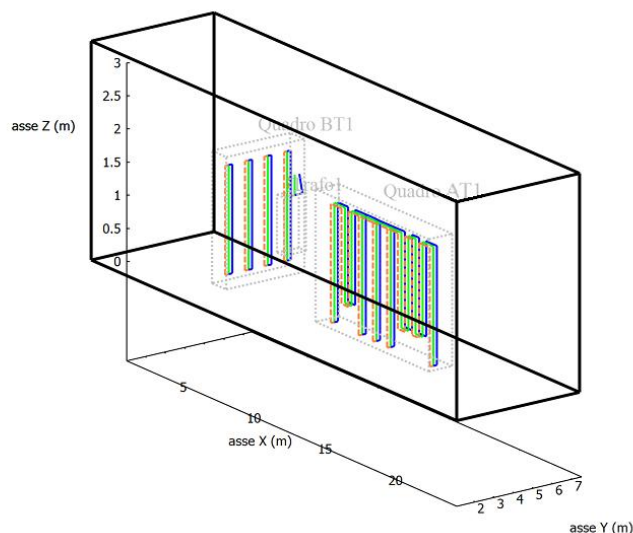
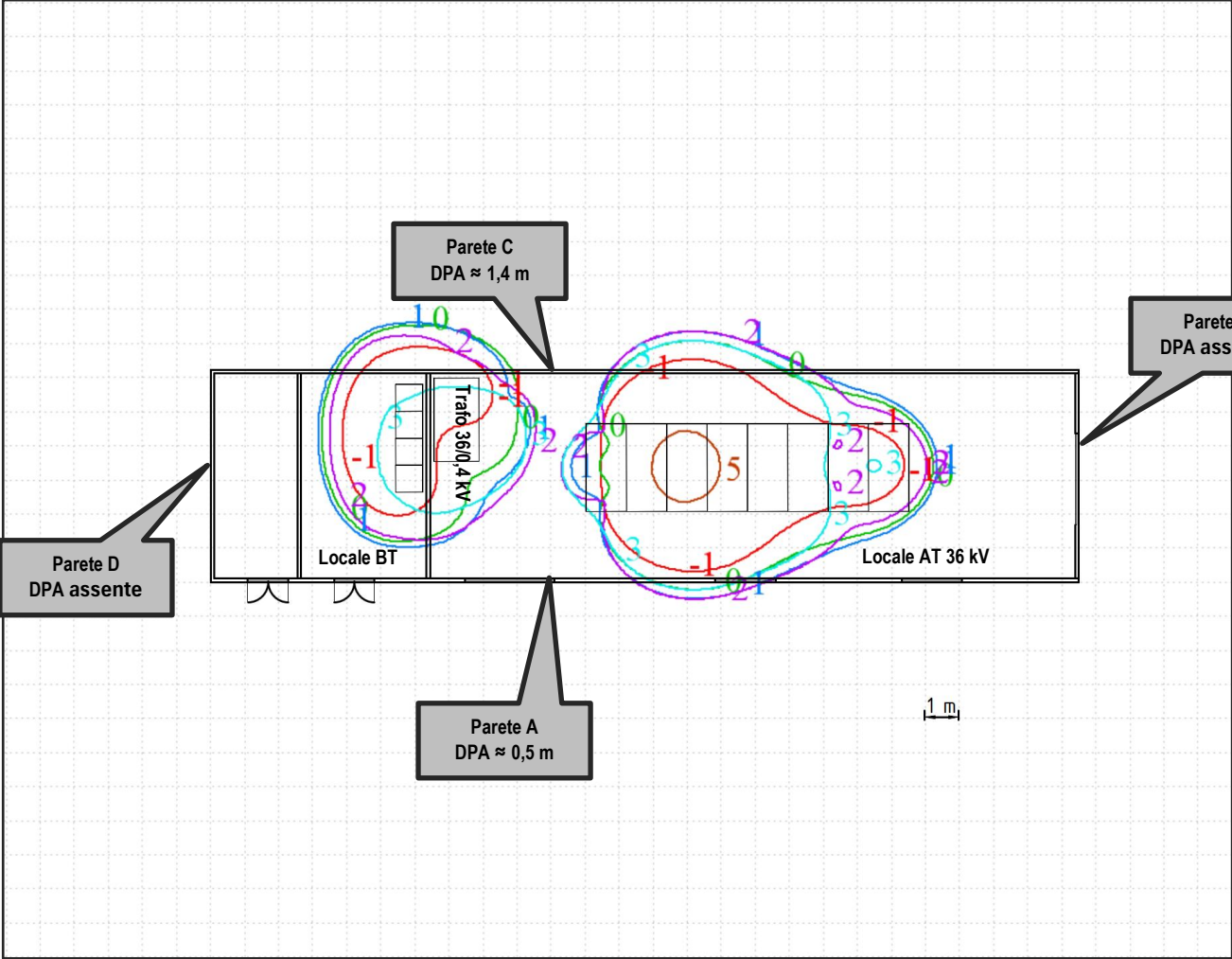



Figura 7.4: Disposizione apparecchiature Cabina di Parallelo

Si rappresenta a diversi valori di quota rispetto al piano di calpestio della cabina stessa (-1m, 0m, 1m, 2m, 3m, 5m) l'andamento della curva isometrica per fissato valore di induzione magnetica, pari a 3 μ T (obiettivo di qualità).

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 20 di 44



LEGENDA	
SIMBOLO	QUOTA RISPETTO AL SUOLO
	z = -1 m
	z = 0 m
	z = 1 m
	z = 2 m
	z = 3 m
	z = 5 m

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 21 di 44

In base alla configurazione interna delle apparecchiature si possono individuare le DPA rispetto ad ogni direzione, nello specifico, indicando con le lettere A, B, C e D le quattro pareti della cabina, l'induzione magnetica laddove essa supera il valore limite di 3 μ T esternamente alle pareti della cabina stessa:

- DPA rispetto alla parete A pari a circa 1,4 m;
- DPA rispetto alla parete B assente;
- DPA rispetto alla parete C pari a circa 0,5 m;
- DPA rispetto alla parete D assente.

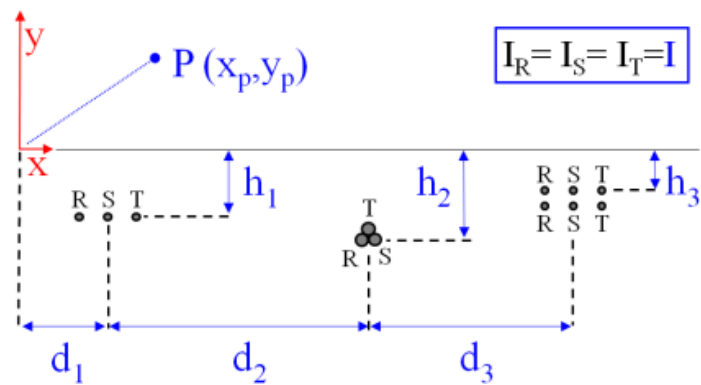
Si stabilisce tuttavia di estendere il valore della DPA più alto a tutte e quattro le pareti della cabina, arrotondando al metro successivo. In conclusione, la Cabina di Parallelo avrà una DPA di 2,0 m, da considerarsi dal filo esterno delle pareti della cabina.

7.6 ELETTRODOTTI INTERRATI AT 36kV INTERNI ALL'IMPIANTO

Le Power Station trasformazione saranno collegati alle cabine di parallelo mediante linea interrata AT 36 kV con posa a trifoglio (tipo ARG7H1R 36 kV o similare), e sezione variabile cautelativamente assunta pari alla massima, ovvero 400 mm².

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 22 di 44

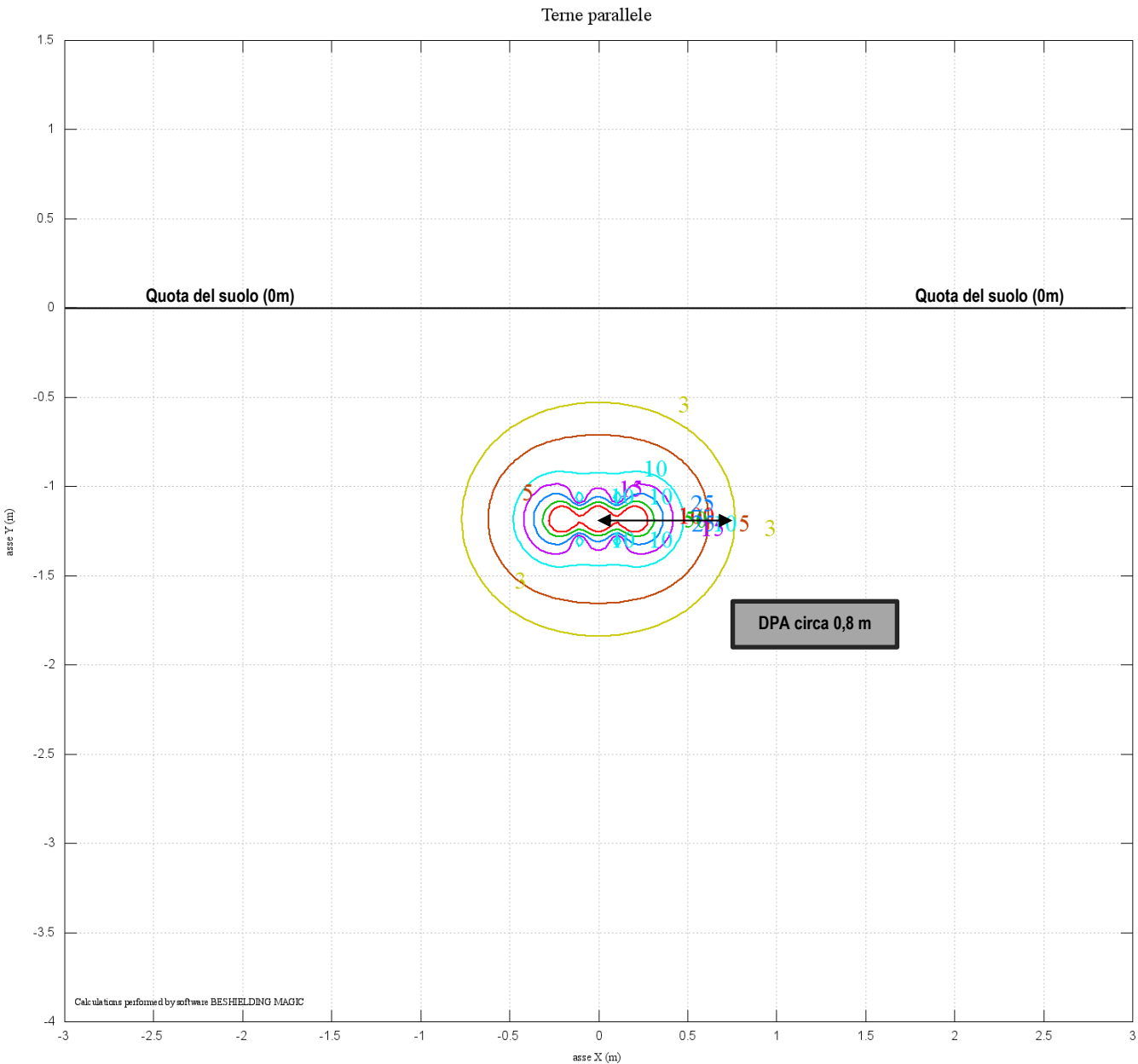
Viene proposta ora un'immagine d'esempio di modellizzazione tipica di elettrodotti.



Le linee AT che collegano le Power Station alle Cabine di Parallelo ed a loro volta le Cabine di Parallelo tra di loro, saranno attraversate da una corrente massima di 40 A ed i conduttori di ogni terna a trifoglio disteranno 0,052 m. Si ipotizza una condizione di parallelismo di tre linee AT con disposizione delle tre terne in piano ad una distanza l'una dall'altra pari a 0,2 m

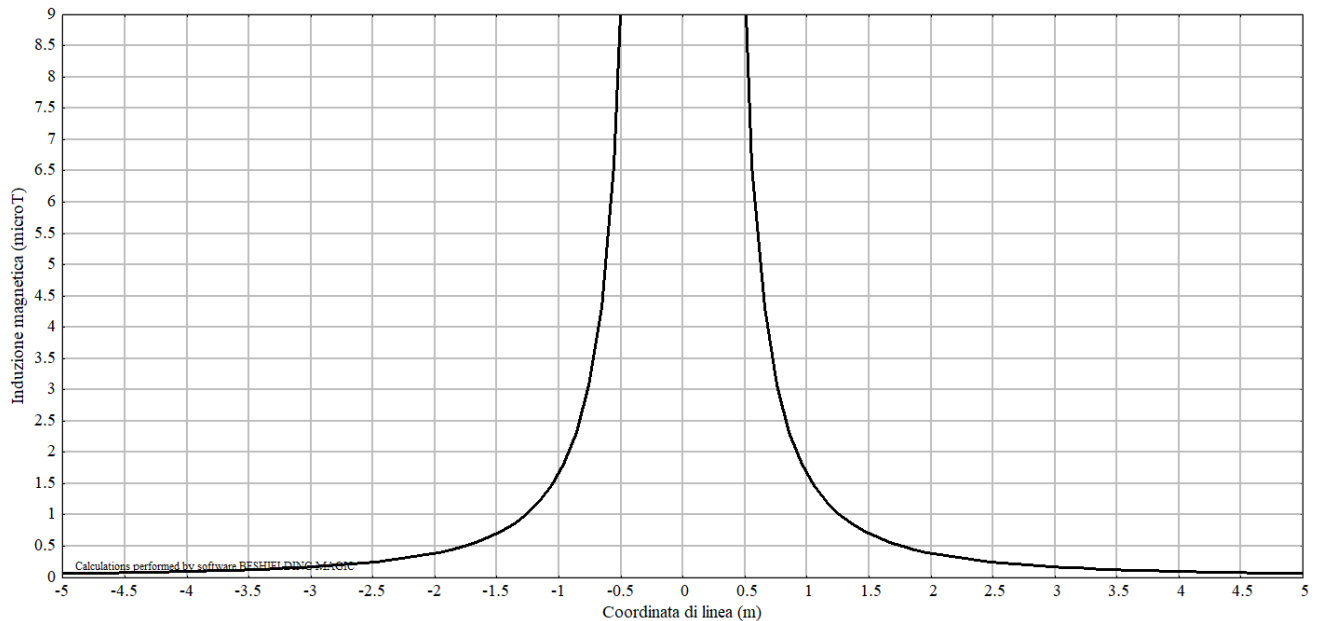
I risultati ottenuti vengono riportati nel seguente grafico rappresentante le curve per fissato valore di induzione elettromagnetica (unità di misura μT).

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 23 di 44



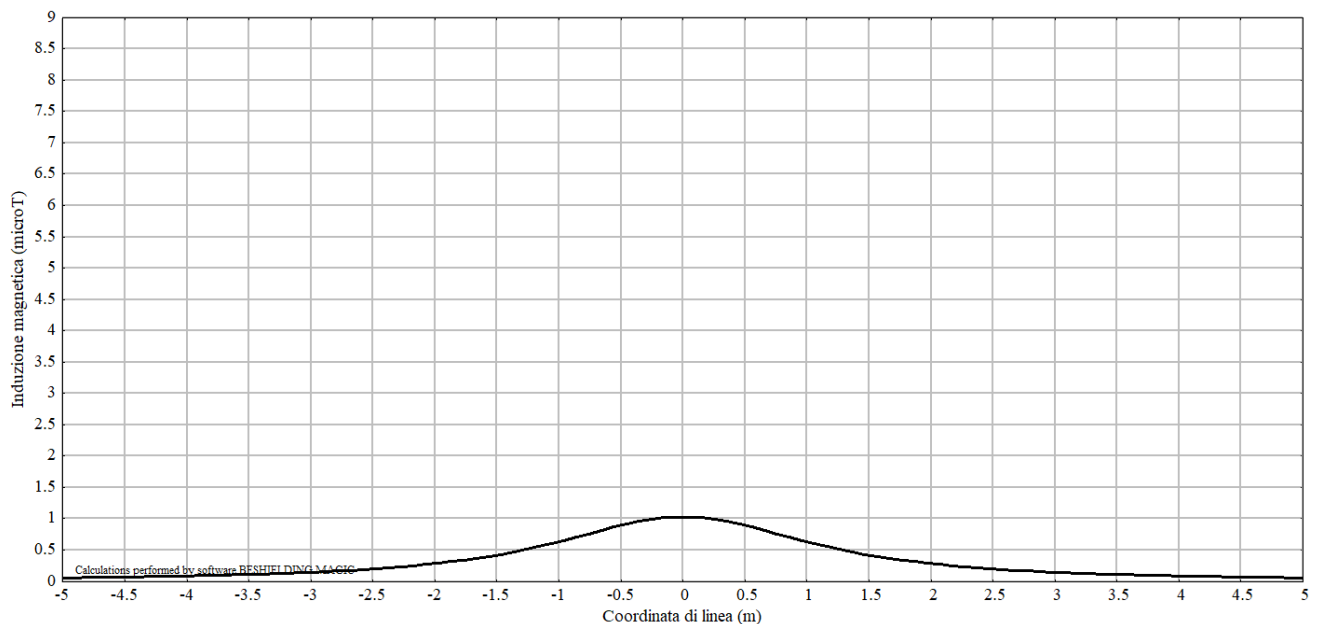
ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 24 di 44

Questi risultati vengono confermati dal seguente grafico, in cui viene riportato l'andamento dell'induzione magnetica ad una quota fissa pari a $-1,2$ m.



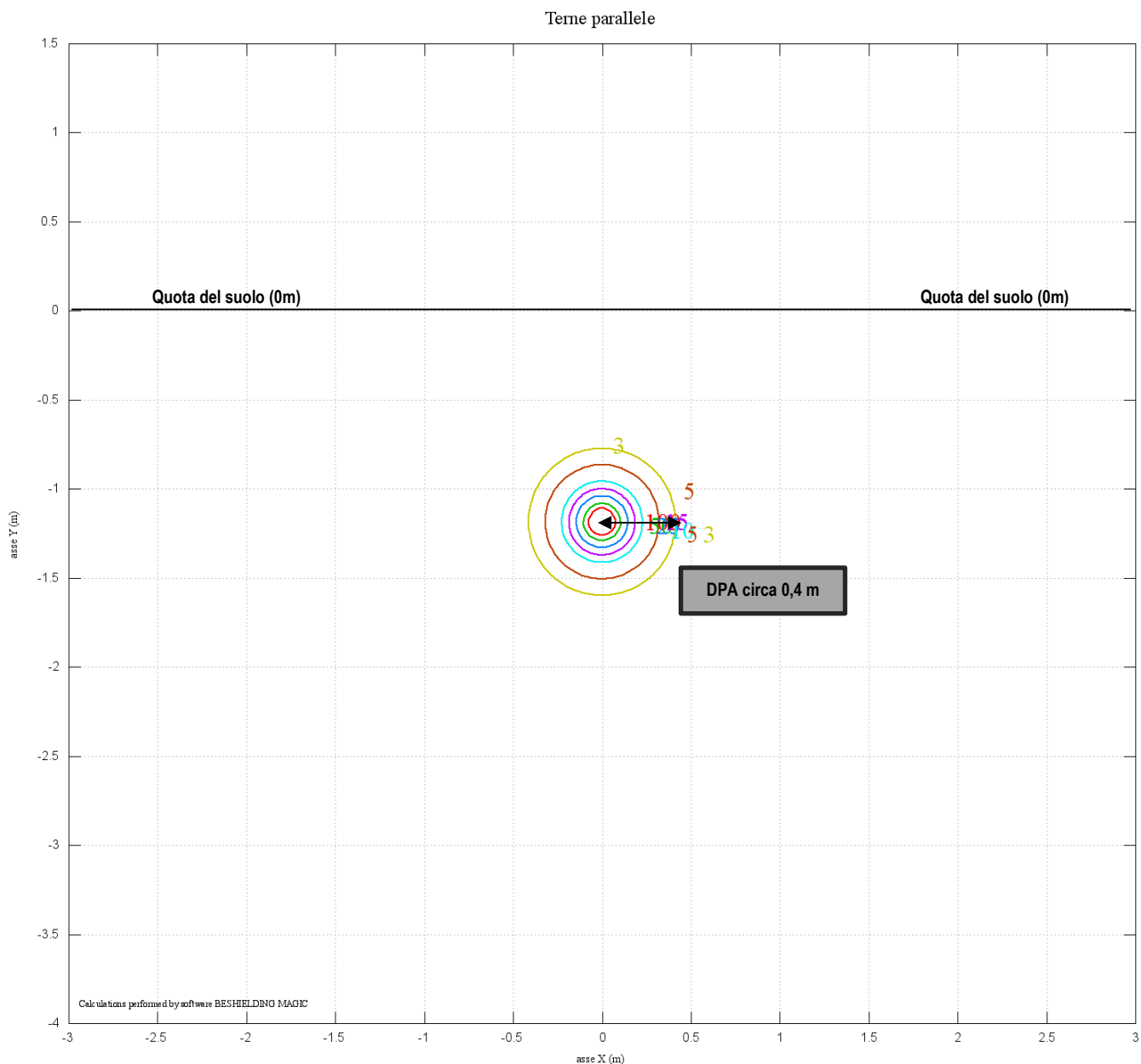
Si considera pertanto una DPA pari a 1,0 m rispetto all'asse centrale della sezione, quindi la fascia di rispetto avrà un'ampiezza sul piano complessiva pari a 2,0 m.

Si riporta per completezza anche l'andamento dell'induzione magnetica alla quota 0 m, ovvero a quota terreno/viabilità.




ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 25 di 44

E' stato perciò considerato il caso gravoso di parallelismo di n. 3 linee. Si evidenzia tuttavia che, in diverse tratte, è prevista la posa di un singolo cavidotto; per completezza di analisi si riporta pertanto anche la valutazione del campo magnetico riferita al caso di una sola linea.



In tal caso la DPA, è pari a 0,5 m rispetto all'asse centrale della sezione, delineando una fascia di rispetto con ampiezza sul piano complessiva pari a 1,0 m.

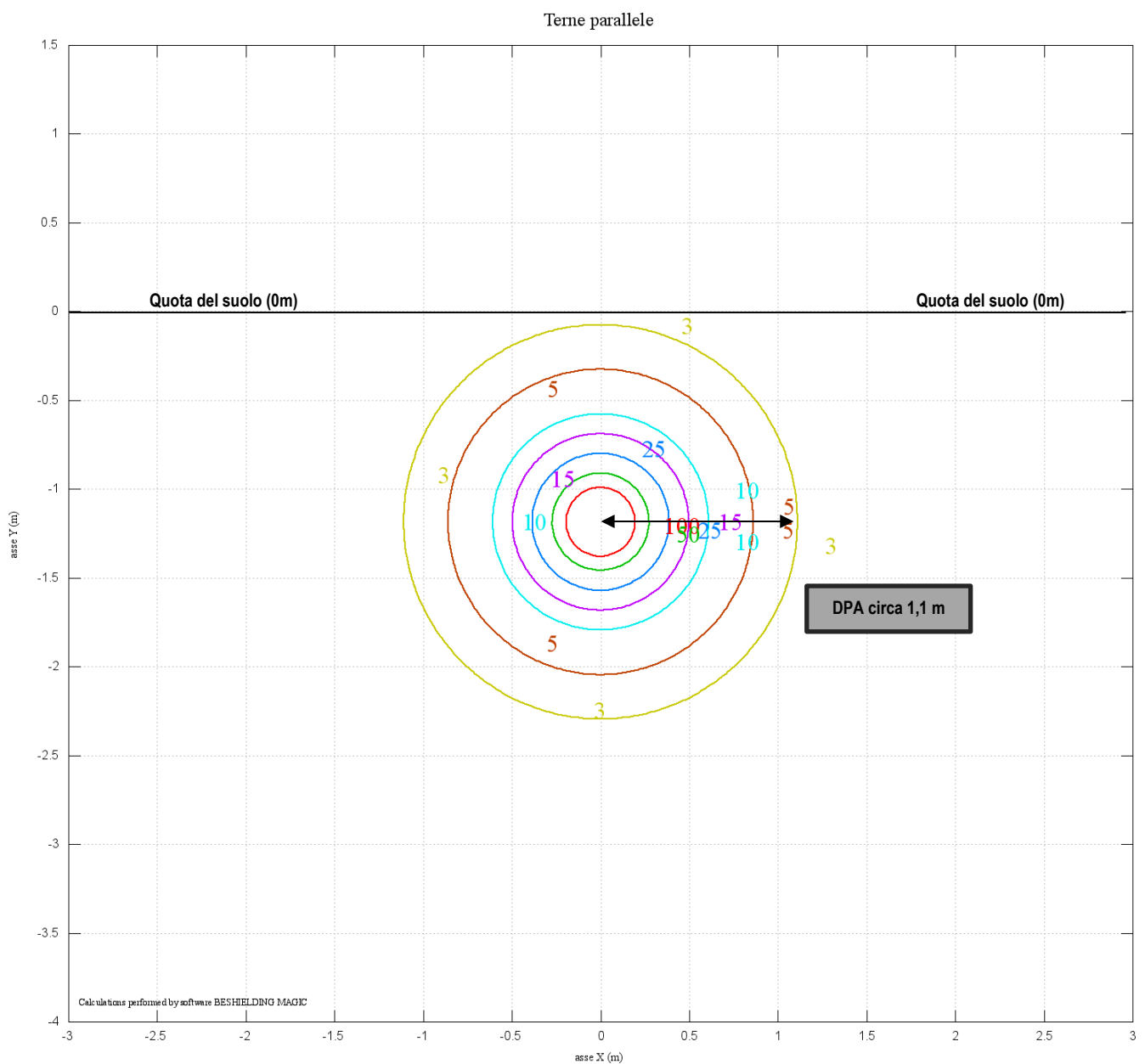
ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 26 di 44

7.7 ELETTRODOTTO DI CONNESSIONE AT 36 kV DA AREA D'IMPIANTO A SE

Dalla cabina di parallelo del campo SC-3 diparte l'elettrodotto AT (36 kV) interrato, costituito da una terna di cavi di tipo RG16H1R12 26/45 kV o similare, costituendo la connessione alla SE PORTOMAGGIORE per l'immissione dell'energia nella RTN. Si prevede l'adozione di cavo di sezione 3x1x400mm².

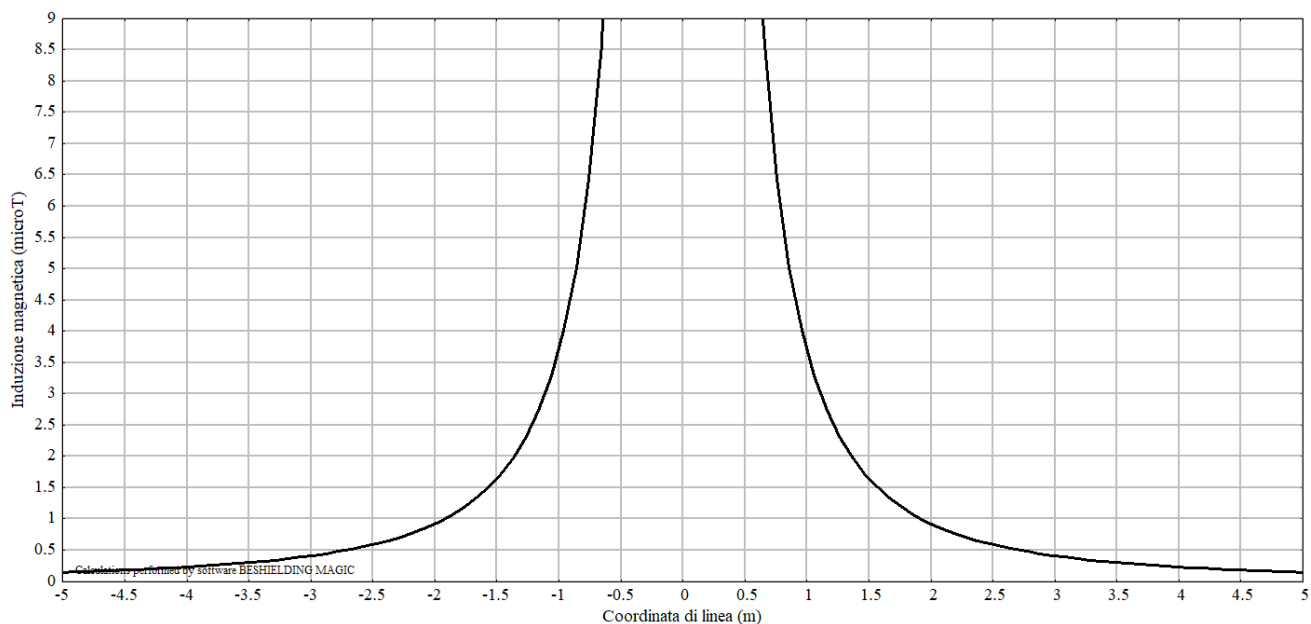
Il cavidotto AT a 36 kV è stato considerato percorso da una corrente complessiva pari a 290 A.

I conduttori sono disposti in configurazione a trifoglio con distanza reciproca pari a 0,052 m. I risultati ottenuti sono riportati nel seguente grafico, nel quale sono rappresentate le curve a valore fissato di induzione magnetica, espressa in μ T.



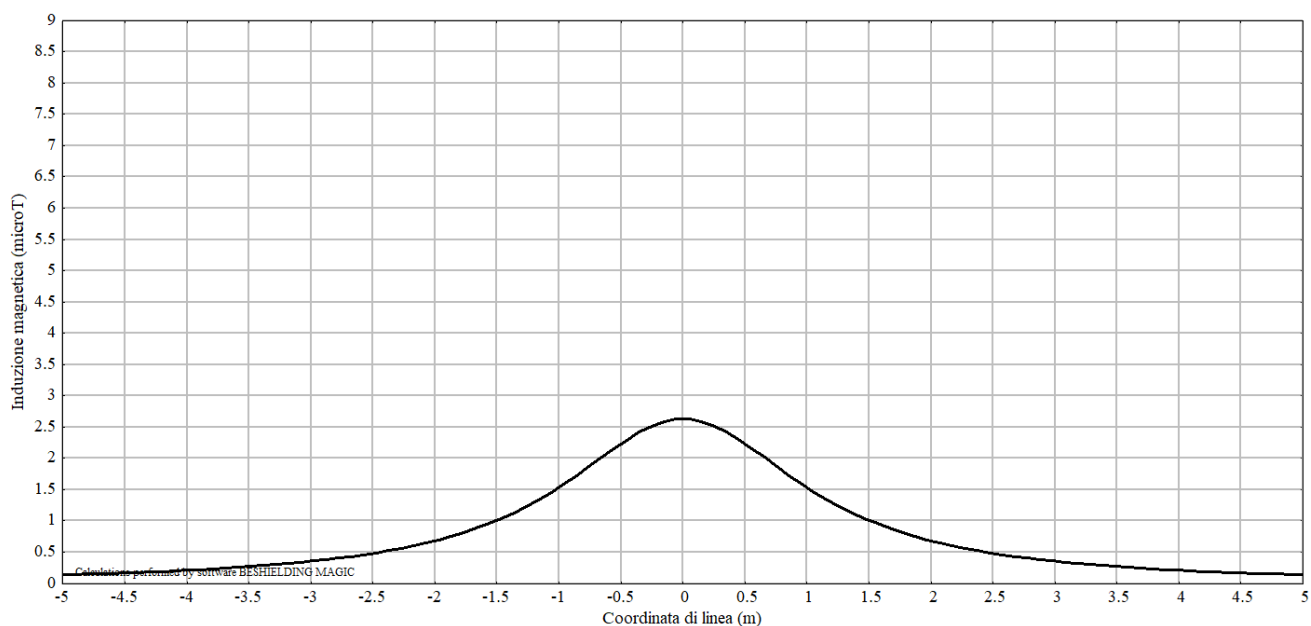
ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 27 di 44

Questi risultati vengono confermati dal seguente grafico, in cui viene riportato l'andamento dell'induzione magnetica ad una quota fissa pari a $-1,2$ m.



Si considera una DPA pari a 1,5 m rispetto all'asse centrale della sezione, quindi la fascia di rispetto avrà un'ampiezza sul piano complessiva pari a 3,0 m.

Si riporta per completezza anche l'andamento dell'induzione magnetica alla quota 0 m, ovvero a quota terreno/viabilità



ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 28 di 44

GIUNTI

Essendo questa tipologia di cavi commercialmente venduta in bobine, occorre prevedere dei giunti.

I giunti servono a collegare tra loro due pezzature contigue di cavo mediante manicotti metallici, chiamati connettori, inoltre provvedono a:

- Mantenere l'isolamento del conduttore e la continuità elettrica tra gli schermi metallici dei cavi;
- Controllare la distribuzione del campo elettrico, per evitare concentrazioni localizzate che possono provocare in breve tempo la perforazione del giunto;
- Alla protezione dell'ambiente nel quale il giunto è posato.

Si riporta di seguito un tipico giunto in materiale retraibile per cavi unipolari in media tensione.



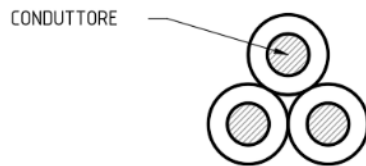
Le giunzioni saranno posizionate lungo il percorso del cavidotto, ogni 500-1000 m.

I singoli giunti unipolari andranno posizionati opportunamente sfasati l'uno dall'altro al fine di evitare effetti cumulativi di campo magnetico. Il posizionamento dei giunti sarà determinato in sede di progetto esecutivo in funzione della lunghezza delle pezzature del cavo e della tipologia di giunti utilizzati.

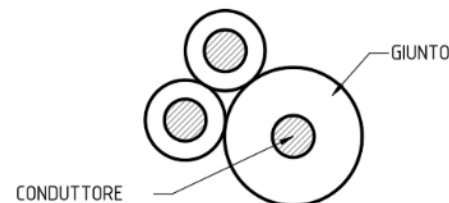
Al fine di valutare la variazione del campo magnetico in corrispondenza di ogni giunto unipolare, è stata valutata una situazione tipica, ovvero una terna di conduttori con uno dei tre conduttori a distanza maggiorata rispetto alla disposizione classica a trifoglio, a simulare la presenza della guaina esterna del giunto di connessione.

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 29 di 44

DISPOSIZIONE DEI CAVI
A TRIFOGLIO



DISPOSIZIONE DEI CAVI IN
CORRISPONDENZA DI UN GIUNTO



Dalle risultanze emerse si evince che il contributo del campo magnetico prodotto da un giunto sia di esigua entità se paragonato all'ampiezza complessiva della fascia di rispetto dell'elettrodotto.

Pertanto la perturbazione del campo magnetico data dalla presenza di un giunto unipolare si può considerare trascurabile al fine del calcolo della DPA.

8. CONCLUSIONI

Le uniche radiazioni associabili a questo tipo di impianti sono le radiazioni non ionizzanti costituite dai campi elettrici e magnetici a bassa frequenza (50 Hz), prodotti rispettivamente dalla tensione di esercizio degli elettrodotti e dalla corrente che li percorre.

I valori di riferimento, per l'esposizione ai campi elettrici e magnetici, sono stabiliti dalla Legge n. 36 del 22/02/2001 e dal successivo 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 di 50 Hz degli elettrodotti".

Per quanto riguarda l'analisi dei campi elettrici, non si è proceduto con il calcolo, in quanto, il campo elettrico al suolo in prossimità di elettrodotti a tensione uguale o inferiore a 150 kV non supera mai il limite di esposizione per la popolazione pari a 5 kV/m, inoltre, il limite di esposizione del campo elettrico risulta sempre rispettato all'interno dei confini dell'impianto.

Sono state condotte invece le analisi dei campi magnetici e dai risultati emersi si può concludere quanto segue:

- La Distanza di Prima Approssimazione (DPA) calcolata per le varie cabine, compresa l'approssimazione per eccesso, risulta pari al massimo a:
 - 2,0 m da considerarsi dal filo esterno di ogni Cabina AT che delle Power Station;
 - 6,0 m da considerarsi dal filo esterno di ogni Cabina BT delle power station;
 - 1,0 m da considerarsi dal filo esterno di ogni Cabina di Consegna;
 - 2,0 m da considerarsi dal filo esterno della Cabina di Parallelo;

Si precisa inoltre che l'area compresa all'interno della DPA non comprende luoghi destinati alla permanenza di persone per più di 4 ore/giorno e sarà accessibile per esigenze di manutenzione, saltuariamente e per limitati periodi di tempo ai soli soggetti professionalmente esposti.

ELABORATO 023000	COMUNE DI PORTOMAGGIORE PROVINCIA FERRARA	Rev.: 02
	REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO SOLARE AGRIVOLTAICO AVANZATO CONNESSO ALLA R.T.N. DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 18.030,60 KW	Data: 18/08/2025
	RELAZIONI TECNICA SULL'IMPATTO ELETTROMAGNETICO	Pagina 30 di 44

- I valori di campo magnetico generato dai tratti di elettrodotto interrato BT 0,8 kV, che vanno dagli inverter di stringa alle Power Station, risultano contenuti e tali per cui la fascia di rispetto, in condizioni ampiamente cautelative, ha ampiezza complessiva pari a 4 m rispetto all'asse centrale del cavidotto;
- I valori di campo magnetico generato dai tratti di elettrodotto interrato AT 36 kV interni all'impianto, risultano contenuti e tali per cui la fascia di rispetto ha ampiezza complessiva pari a 2 m rispetto all'asse centrale del cavidotto;
- I valori di campo magnetico generato dall'elettrodotto interrato AT 36 kV di connessione tra l'area di impianto e la SE PORTOMAGGIORE, risultano contenuti e tali per cui la fascia di rispetto ha ampiezza complessiva pari a 3 m rispetto all'asse centrale del cavidotto;
- Per l'elettrodotto AT 36 kV di connessione, è stato considerato trascurabile il contributo dei giunti di connessione al fine del calcolo della DPA in quanto di esigua entità rispetto alla fascia di rispetto già individuata per l'elettrodotto.

Le DPA individuate per apparecchiature e conduttori fonti di campi elettromagnetici interne all'impianto, sono per la maggior parte contenute all'interno delle recinzioni dello stesso, ad eccezione dei cavidotti AT 36 kV che connettono le cabine di consegna dei sottocampi alla cabina di parallelo, le cui DPA non comprendono aree destinate alla permanenza di persone per più di 4 ore/giorno e/o recettori sensibili, e dei cavidotti BT perimetrali, le cui DPA ricadono in parte all'interno della fascia di mitigazione, non intercettando alcun recettore sensibile.

È importante evidenziare altresì che tutte le DPA individuate all'interno della presente relazione sono state calcolate considerando valori di correnti coerenti a un funzionamento degli impianti a piena potenza. Si sottolinea tuttavia che, nella pratica, gli impianti non operano costantemente al massimo della loro capacità: nel caso del fotovoltaico, ad esempio, le condizioni di massimo funzionamento vengono raggiunte solo per poche ore l'anno. Considerando questo, e tenuto conto che le DPA sono state approssimate per eccesso nella maggior parte dei casi, i risultati ottenuti possono essere considerati conservativi e rappresentativi delle condizioni di sicurezza effettive.

Si rimanda alla consultazione della planimetria con individuazione delle DPA per una visualizzazione grafica delle fasce di rispetto relative alle aree d'impianto ed alla connessione, calcolate nella presente relazione.



Documento di Validazione

Algoritmi di calcolo del software MAGIC® (**MAG**netic Induction **CAL**culation)

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 riferimento al configurazioni impiantistiche con particolare 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).



BESHIELDING

2. Verifica del modulo bidimensionale

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

2.1. Confronto con CEI 211-04

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

Sotto queste ipotesi l'induzione magnetica B è data dall'espressione:

$$\vec{B} = \frac{\mu^0}{2\pi} \sum_{k=1}^N \frac{I_k}{d^k} \vec{u}_i \times \vec{u}_r$$

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

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

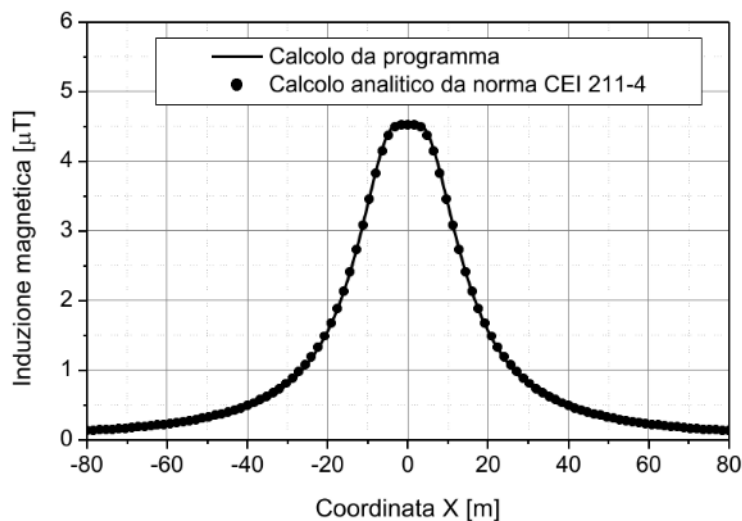


Figure 1 Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

2.2. Confronto con codice CESI

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

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

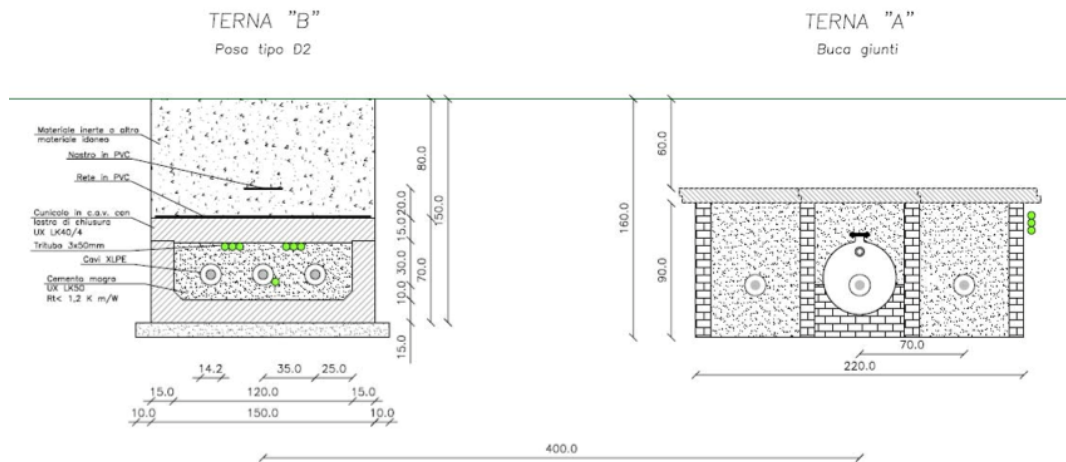


Figure 2 Affiancamento tra due linee interrate AT

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.

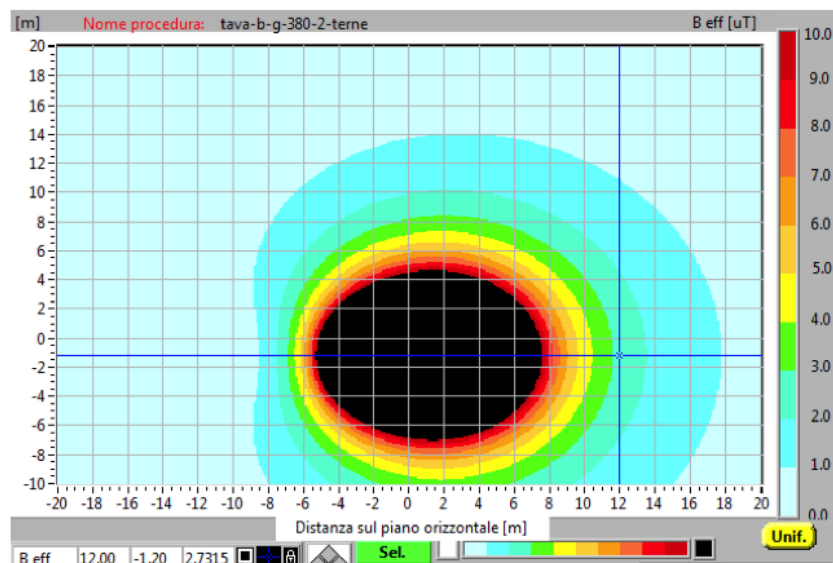


Figure 3 Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.

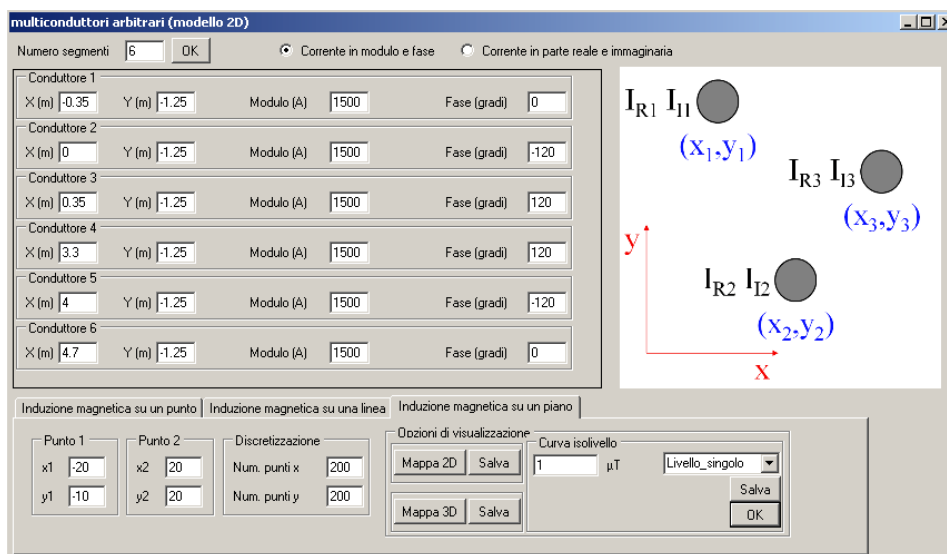


Figure 4 Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)”: dati definizione geometria e sorgenti

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

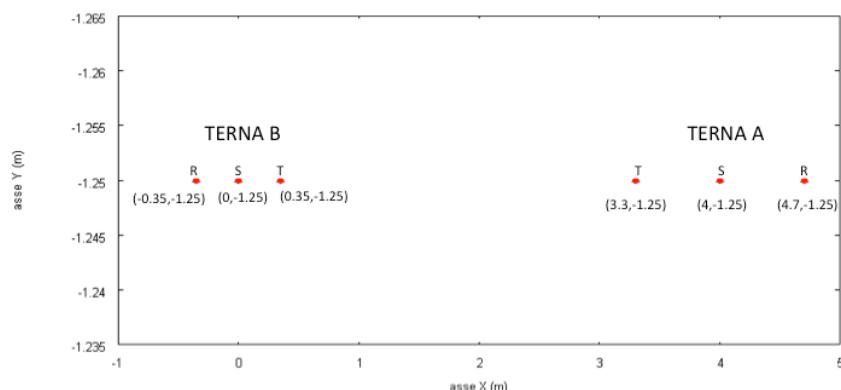


Figure 5 Geometria sorgenti

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

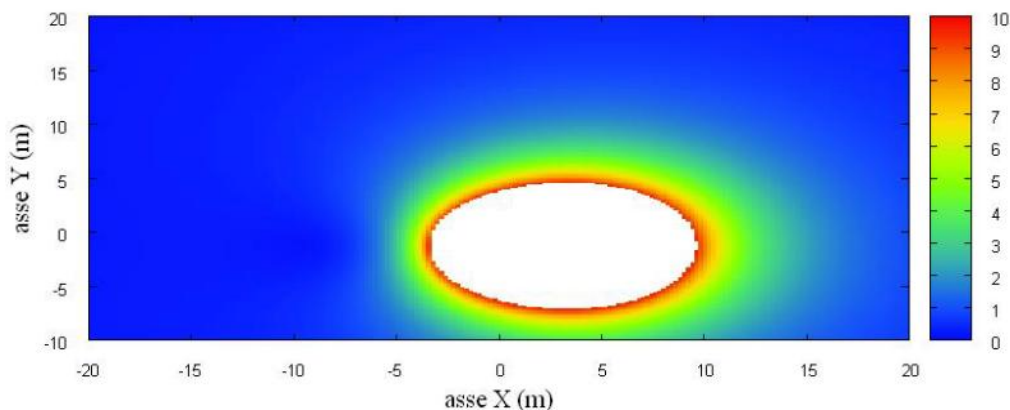


Figure 6 Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):



BESHIELDING

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

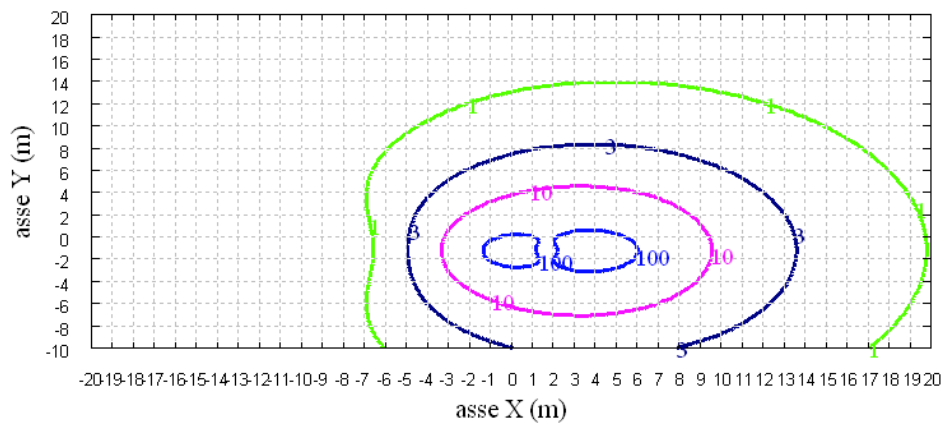


Figure 7 Linee isolivello dell'induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®
Come si può osservare le mappe cromatiche dei due modelli risultano essere in perfetto accordo.

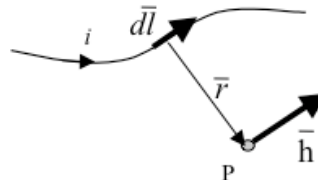


BESIELDING

3. Verifica del modulo tridimensionale

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

$$\vec{h} = \int \frac{i d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^2}$$



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.

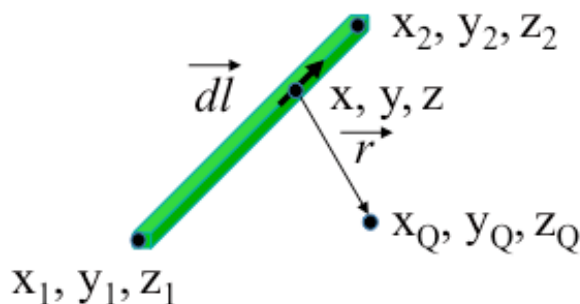


Figure 8 Modello del segmento.

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:

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

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



BESHIELDING

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.

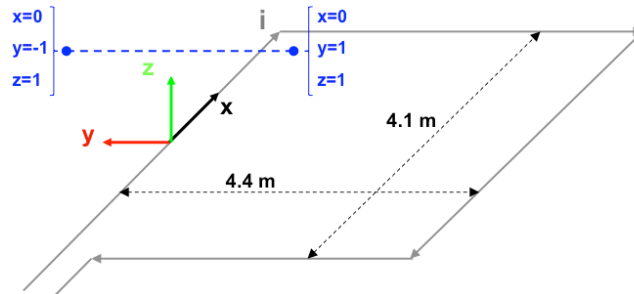


Figure 9 Schema di spira quadrata.

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 estende 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.

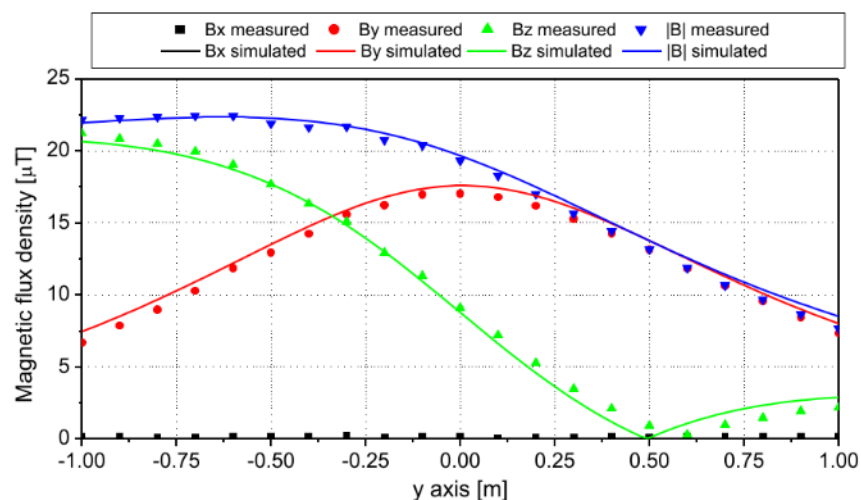


Figure 10 Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC.

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



BESHIELDING

4. Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza

In questa sezione vengono riportati i principali risultati ottenuti utilizzando il software MAGIC® nella simulazione dei campi generati da un trasformatore in resina (il trasformatore in olio rappresenta una situazione semplificata rispetto a quello in resina).

La validazione è condotta in due step:

- Verifica del modello MAGIC della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method)
- Verifica del modello MAGIC del trasformatore completo con misure sperimentali

Maggiore dettaglio sui confronti sono riportati nella seguente referenza:

A. Canova, L. Giaccone, M. Manca, R. Turri, P. Casagrande, "Simplified power transformer models for environmental magnetic impact analysis", 2° Int. Conf. on EMF-ELF, Paris, 24-25 Marzo 2011.

4.1. Verifica del modello MAGIC® della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method)

MAGIC® propone due diversi modelli per il trasformatore: il primo di tipo semplificato e valido a partire da circa 0.5-1m dal trasformatore, il secondo più rigoroso valido anche a piccole distanze dal trasformatore. Nel seguito i due modelli verranno indicati come Modello 1 e Modello 2.

Un primo confronto tra i due modelli è stato effettuato con un codice agli elementi finiti (FEMM) di tipo assialsimmetrico. In Figura 11 sono riportate le principali dimensioni del caso analizzato: avvolgimento primario e secondario di un trasformatore di 630 kVA e l'indicazione delle linee di calcolo.

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

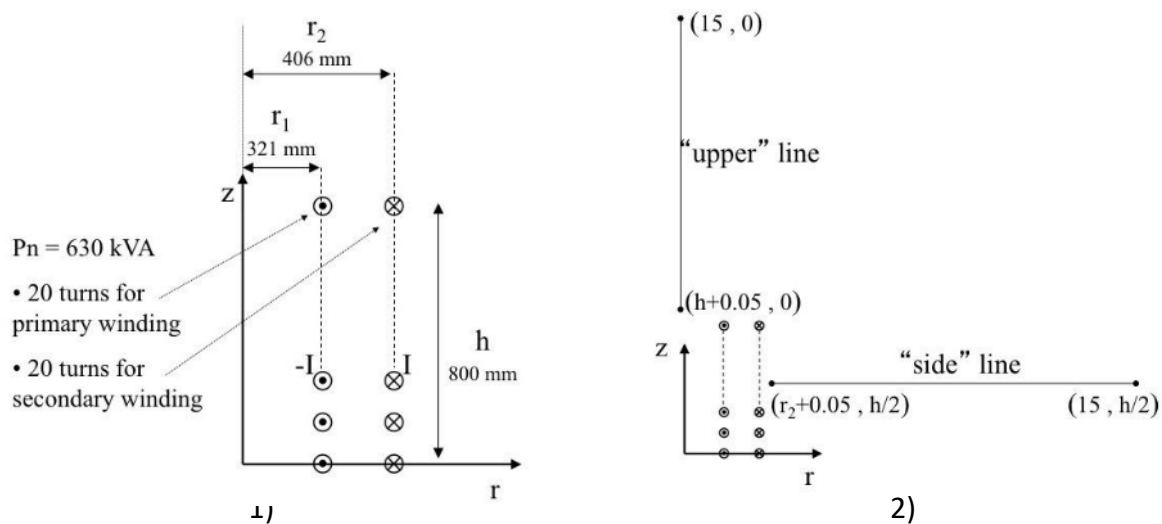


Figure 11 Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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



BESHIELDING

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).

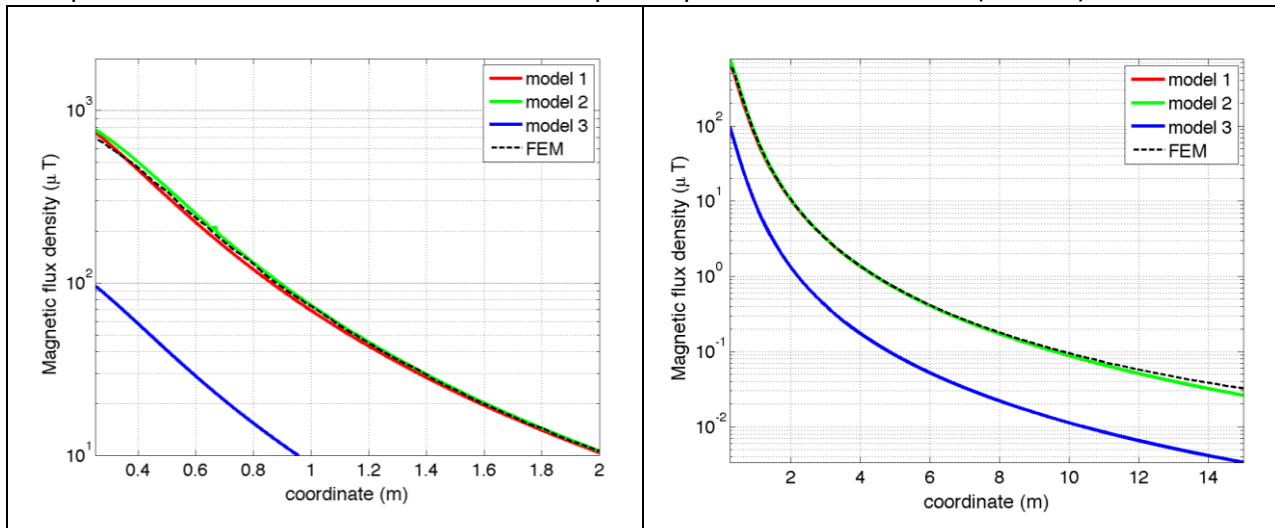


Figure 12 Induzione magnetica lungo la linea laterale

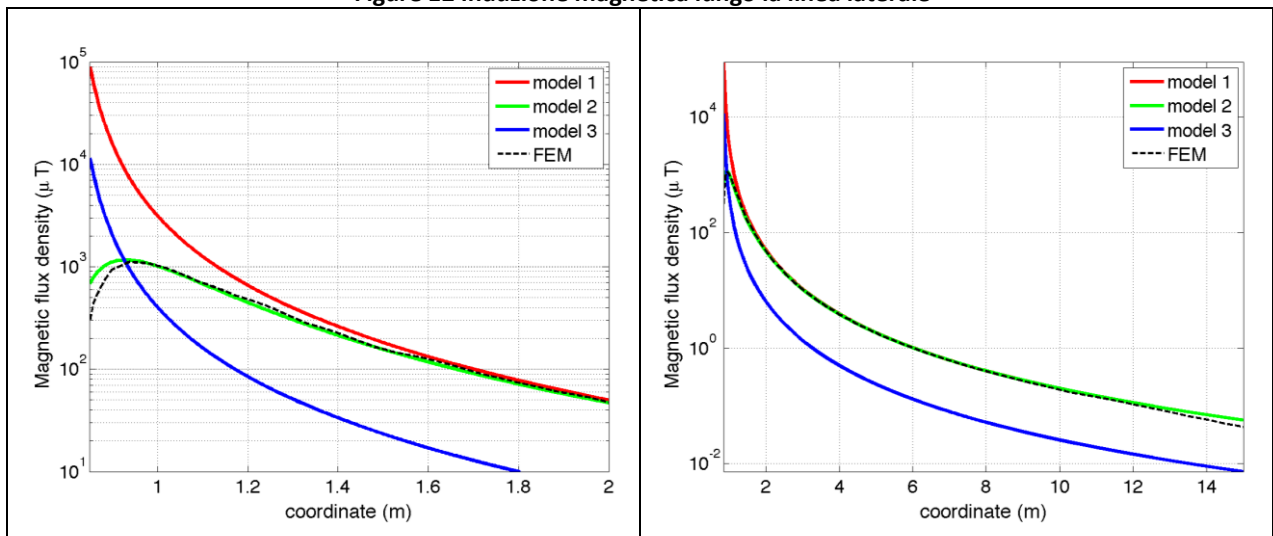


Figure 13 Induzione magnetica lungo la linea superiore



BESHIELDING

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.

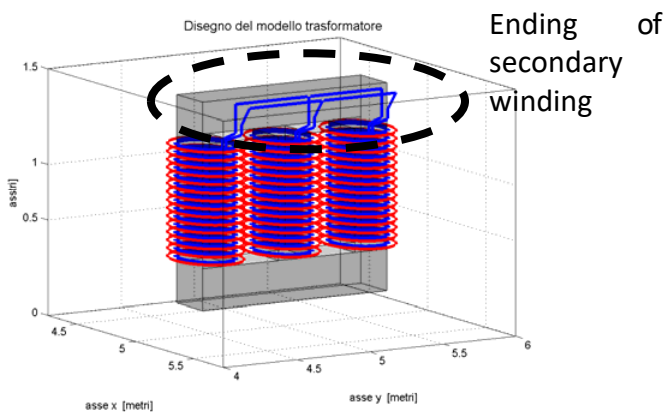


Figure 14 Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

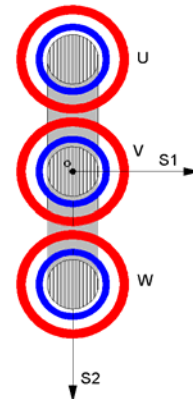


Figure 15 Linee di calcolo S1 ed S2



BESHIELDING

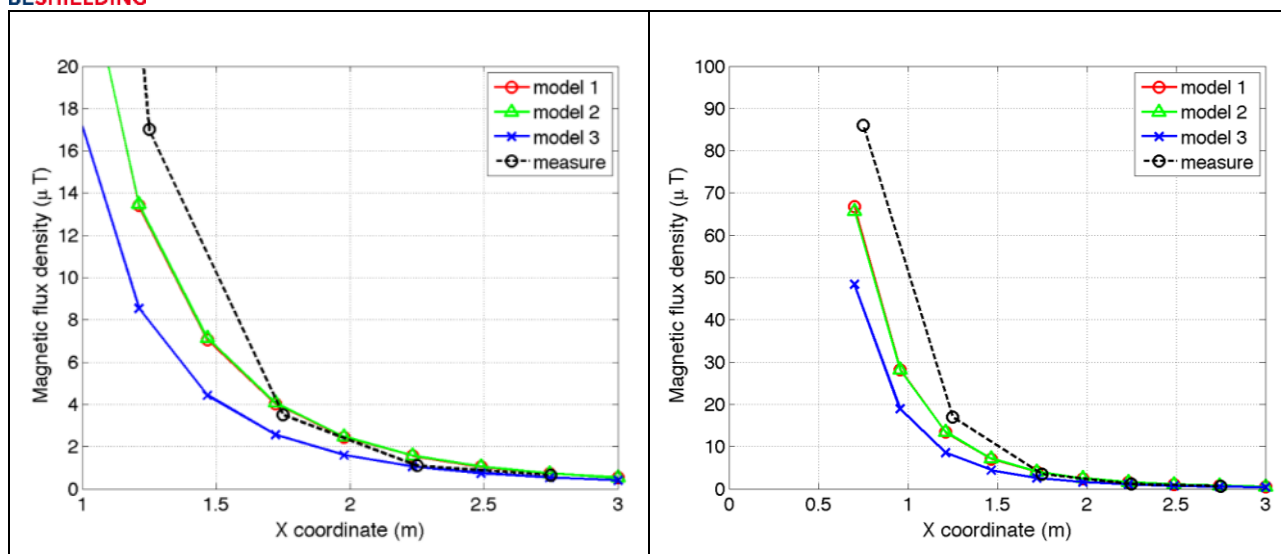


Figure 16 Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

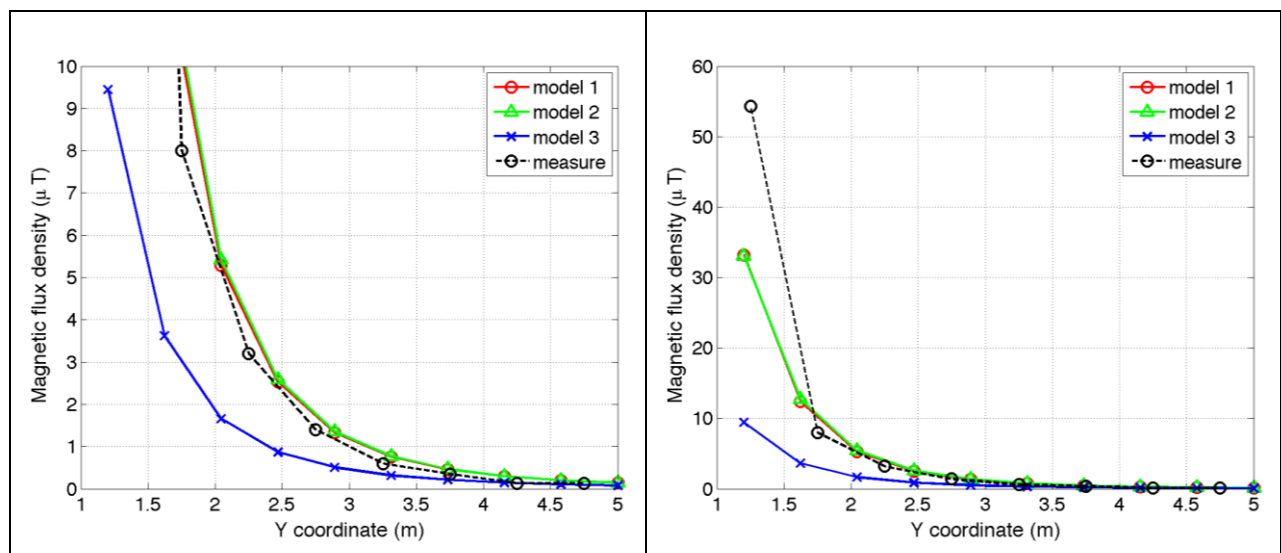


Figure 17 Confronto tra misure modelli lungo la linea S2



BESIELDING

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.