



LIO ENERGY
Rosso

Regione Emilia-Romagna
Comune di Fiscaglia (FE)

**IMPIANTO AGRIVOLTAICO “FISCAGLIA”
ED OPERE CONNESSE**
Potenza Impianto 178,1 MWp

Proponente

LIO ENERGY ROSSO S.R.L.
VIA ARRIGO BOITO, 8 - 20121 - MILANO (MI)
P.IVA: 13676640967 – PEC: lioenergyrosso@legalmail.it

LIO ENERGY
Rosso

Progettazione

AREE TECNICHE S.R.L.
VIA G. FRESCOBALDI 8 - 44121
FERRARA (FE) - P.IVA: 02135640387
Tel.: +39 0532 209155
email: info@areetecniche.it



Specialistica

Coordinamento progettuale

SOLAR IT S.R.L.
VIA ILARIA ALPI 4 - 46100 - MANTOVA (MN) - P.IVA: 02627240209 - PEC: solarit@lamiappec.it
Tel.: +39 0425 1431056 - email: info@solaritglobal.com



Dati documento

RELAZIONE COMPATIBILITA' ELETTROMAGNETICA

LIVELLO PROGETTO	NOME ELABORATO	FILE NATIVO	DATA
DEFINITIVO	22-040-RS-R06_0	22-040-RS-R06_0.docx	30/04/2025

Revisioni

REV	DATA	DESCRIZIONE	ESEGUITO	VERIFICATO	APPROVATO
0	30/04/2025	PERMITTING	ATs	SOL	LIO





RELAZIONE COMPATIBILITA' ELETTROMAGNETICA

INDICE

1	PREMESSA	1
2	NORMATIVA E LEGGI DI RIFERIMENTO	3
3	LIMITI DI COMPATIBILITÀ ELETTROMAGNETICA	4
4	SORGENTI A BASSA FREQUENZA (ELF).....	5
5	CAMPO ELETTRICO.....	6
6	CAMPO MAGNETICO	6
6.1	CAMPO FOTOVOLTAICO	7
6.2	CABINATI PCS (POWER CONVERSION SYSTEM)	7
6.3	ELETTRODOTTO MT TRA CABINA DI CAMPO (CC) A CABINA DI RICEVIMENTO (CR).....	10
6.4	CABINA DI CAMPO (CC)	13
6.5	CABINA DI RICEVIMENTO (CR)	16
6.6	ELETTRODOTTO MT CONNESSIONE (VERSO SSE).....	18
6.6.1	GIUNTI	21
7	CONCLUSIONI	23
8	ALLEGATI	24

1 PREMESSA

La Società Proponente LIO ENERGY ROSSO S.R.L., con sede legale in Via Arrigo Boito, 8, Milano (MI), CAP. 20121 ha in progetto lo sviluppo di un impianto agrivoltaico denominato “Fiscaglia” e relative opere di connessione alla RTN della potenza nominale pari a 178,1MWp da installare nel Comune di Fiscaglia, località Massa Fiscaglia.

L’impianto agrivoltaico in oggetto sarà installato su aree classificate zona agricola ricadenti nel territorio del comune di Fiscaglia (FE). L’impianto FV avrà i moduli installati su strutture a terra, ovvero su apposite strutture di sostegno (Tracker) direttamente infisse nel terreno senza l’ausilio di elementi in calcestruzzo, sia prefabbricato che gettato in opera.



Figura 1-1 – Collocazione geografica impianto, cavidotto, SSE

Nell’immagine satellitare di cui sopra, l’area occupata dall’impianto fotovoltaico è evidenziata in rosso, mentre è indicato con una linea blu l’elettrodotto collegato in antenna a 30 kV sulla sottostazione SSE Utente 132KV (giallo), condivisa con altro produttore, il quale ha già provveduto ad avviare procedura di VIA al MASE (Impianto Agrivoltaico di Jolanda di Savoia (FE) – Pratica MASE ID: 10685 - cod. pratica Terna Nr. 202202929 del 04/11/2022). A sua volta la SSE sarà collegata alla Stazione Elettrica (SE) di Trasformazione 380/132/36 kV, già autorizzata, da inserire in entra-esce alla linea RTN 380 kV “Ravenna Canala – Porto Tolle” e alle linee RTN 132 kV afferenti alla Cabina Primaria Codigoro ricollegata in doppia antenna alla suddetta Stazione Elettrica, come indicato nella Soluzione Tecnica Minima Generale (verde).

Si riportano di seguito le coordinate geografiche dei punti perimetrali delle aree nella disponibilità della Società Proponente.



ID	Latitudine N	Longitudine E Greenwich
1	44.81449908	12.08425660
2	44.81495478	12.09210402
3	44.80598041	12.09303744
4	44.80532507	12.08632816
5	44.79865950	12.08776545
6	44.79619301	12.08531985
7	44.79506793	12.08021276
8	44.79134075	12.08267266
9	44.79011170	12.07935080
10	44.78479748	12.08284308
11	44.78088936	12.07121772
12	44.79029683	12.06538873
13	44.79738760	12.06237775
14	44.80364532	12.06124412

Tabella 1 - Coordinate geografiche Impianto agrivoltaico "Fiscaglia"

L'impianto sarà organizzato come segue: l'energia prodotta dalle stringhe fotovoltaiche verrà opportunamente raccolta dai PCS (Power Conversion Systems) presenti all'interno dell'area d'impianto in un numero totale di 49 unità. La totalità dei PCS sarà suddivisa in 6 gruppi, ognuno afferente ad una cabina di campo (CCn) ed alla cabina di ricevimento (CR) che svolgerà sia funzione di cabina di campo, sia funzione di raccolta delle linee MT provenienti da tutte le altre cabine di campo ed infine sarà interfaccia tra l'impianto fotovoltaico e la connessione verso la Sottostazione elettrica.

Dal punto di vista fisico le onde elettromagnetiche sono un fenomeno 'unitario', cioè i campi e gli effetti che producono si basano su principi del tutto uguali; la grandezza che li caratterizza è la frequenza.

In base ad essa è di particolare rilevanza, per i diversi effetti biologici che ne derivano e quindi per la tutela della salute, la suddivisione in:

- Radiazioni ionizzanti, ossia le onde con frequenza altissima, superiore a 3 milioni di GHz, e dotate di energia sufficiente per ionizzare la materia;
- Radiazioni non ionizzanti (NIR), ovvero le onde con frequenza inferiore a 3 milioni di GHz, che non trasportano un quantitativo di energia sufficiente a ionizzare la materia.

All'interno delle radiazioni non ionizzanti si adotta una ulteriore distinzione in base alla frequenza di emissione:

- Campi elettromagnetici a bassa frequenza o ELF: (0 - 300 Hz), le cui sorgenti più comuni comprendono ad esempio gli elettrodomesti e le cabine di trasformazione, gli elettrodomestici, i computer;
- Campi elettromagnetici ad alta frequenza o a radiofrequenza RF: (300 Hz - 300 GHz), le cui sorgenti principali sono i radar, gli impianti di telecomunicazione, i telefoni cellulari e le loro stazioni radio base.

Si individueranno, in base al DM del MATTM del 29.05.2008, le DPA per le opere sopra riportate.

Nel presente studio sono state prese in considerazione le condizioni maggiormente significative al fine di valutare la rispondenza ai requisiti di legge dell'impianto in oggetto.

2 NORMATIVA E LEGGI DI RIFERIMENTO

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 elettrodomesti";
- Decreto ministeriale 29.05.2008 "Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodomesti".

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 elettrodomesti 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”.

3 LIMITI DI COMPATIBILITÀ 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

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

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 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).

4 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.

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, 132, 220 e 380 kV per l'alta tensione.

5 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 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, 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.

6 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 oggetto del presente studio, in quanto potenziali sorgenti di campo magnetico a bassa frequenza (ELF) sono:

- Campo fotovoltaico (moduli fotovoltaici);
- Stazioni di conversione e trasformazione (PCS), dotati di quadri bt, MT e trasformatore bt/MT;
- Elettrodotti interrati (MT) 30 kV tra cabine di campo (CC) e cabina di ricevimento (CR);
- Cabina di campo;
- Cabina di Ricevimento;
- Elettrodotto interrato (MT) 30 kV dalla cabina di ricevimento (CR) alla Sottostazione elettrica (SSE).

6.1 CAMPO FOTOVOLTAICO

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

Considerato che:

- Tale sezione di impianto ha 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;
- I cavi relativi alle dorsali principali, ovvero gli unici che trasportano un valore di corrente significativo (da uscita quadri stringa ad inverter) sono molto distanti dai confini dell'impianto

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

6.2 CABINATI PCS (POWER CONVERSION SYSTEM)

All'interno di ciascun PCS, le principali sorgenti di emissioni sono il trasformatore elevatore 0,8/30kV da 3437 kVA e rispettivamente il quadri elettrici MT a 30 kV e bt a 0,8 kV.



Figura 6-1 Cabinato PCS

In particolare, il trasformatore 0,8/30 kV è isolato in olio, dunque contenuto in un involucro metallico che fornisce un effetto schermante, ciò impedisce al campo magnetico degli avvolgimenti di avere un contributo significativo nelle emissioni; differentemente, non possono essere trascurati i contributi dati rispettivamente dai conduttori MT in uscita al trasformatore ed i conduttori bt in entrata; questi ultimi costituiscono la fonte maggiore di emissioni di campo magnetico.

Si è proceduto quindi alla modellizzazione di tali componenti.

La simulazione dell'andamento del campo magnetico generato dalle apparecchiature è stata ottenuta modellizzando il container come cabina elettrica all'interno del software MAGIC della società Beshielding, di seguito si illustra la disposizione di apparecchiature all'interno della cabina e la geometria dei conduttori.

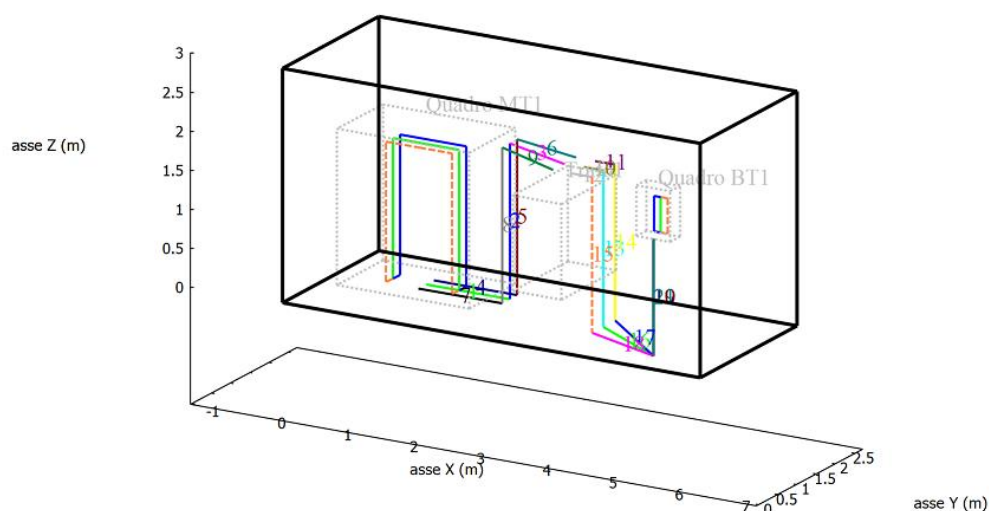
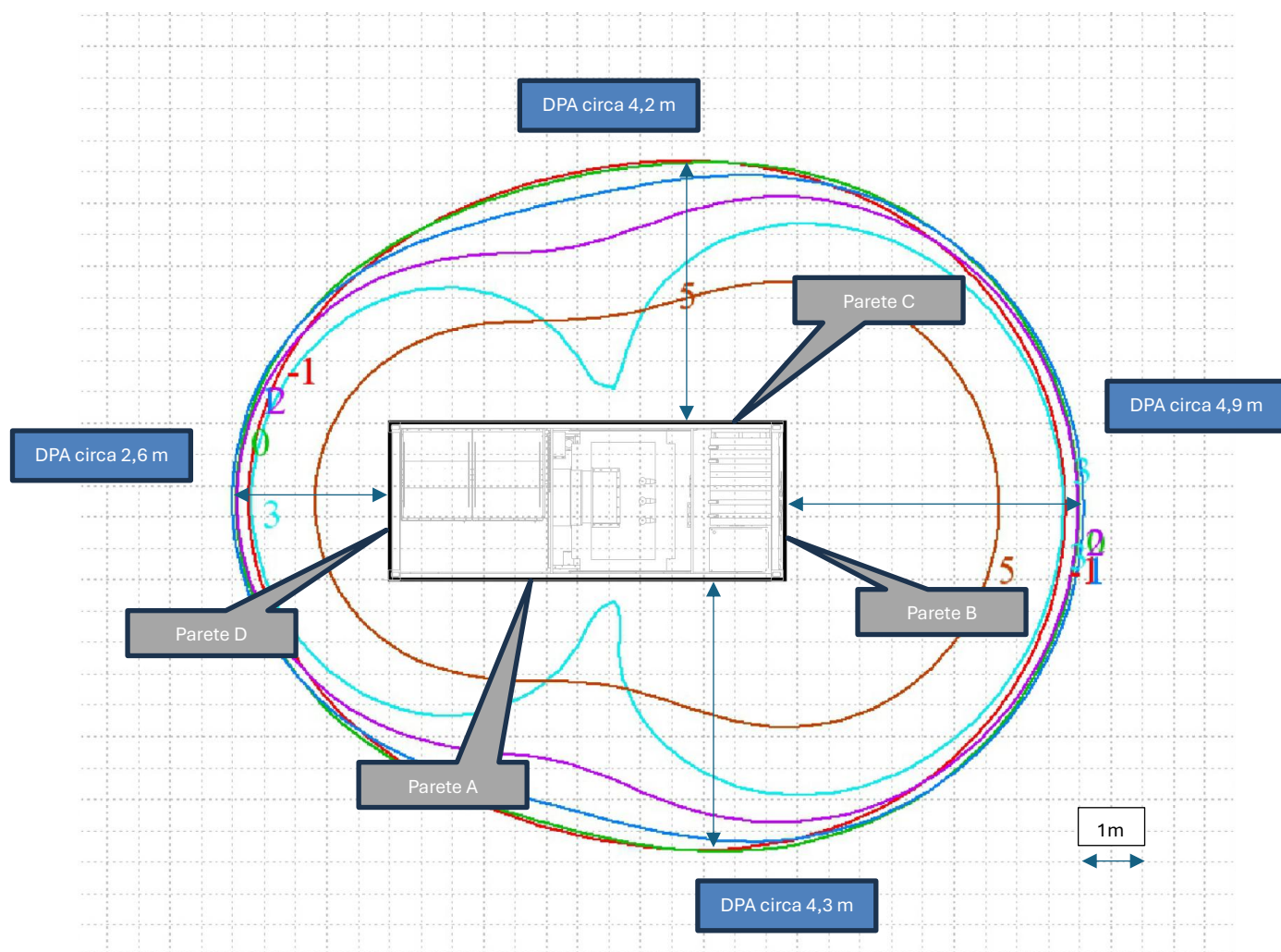


Figura 6-2 Disposizione apparecchiature all'interno del cabinato PCS

In base alla configurazione interna della cabina e dalla conoscenza dei principali parametri si è determinato 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 $3\mu\text{T}$ (obiettivo di qualità), al fine di individuare le DPA rispetto al filo esterno della parete della cabina.



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

L'immagine sopra riportata le pareti esterne di un tipico cabinato PCS (dim. 6,06 x 2,90 x 2,44 m). Ogni linea colorata rappresenta una curva isometrica a fissato valore di induzione magnetica ($3 \mu\text{T}$, obiettivo di qualità) per varie quote (indicate in figura).

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 $3 \mu\text{T}$ esternamente alle pareti della cabina stessa:

- DPA rispetto alla parete A pari a circa 4,3 m;
- DPA rispetto alla parete B pari a circa 4,9 m;
- DPA rispetto alla parete C pari a circa 4,2 m;
- DPA rispetto alla parete D pari a circa 2,6 m;

Al fine di fornire risultati maggiormente cautelativi si estende il valore della DPA più alto a tutte e quattro le pareti della cabina, arrotondando al metro successivo. In conclusione, ogni cabinato PCS avrà una DPA di 5,0 m, da considerarsi dal filo esterno delle pareti della cabina.

Si illustra di seguito a titolo esemplificativo l'applicazione della succitata Dpa.

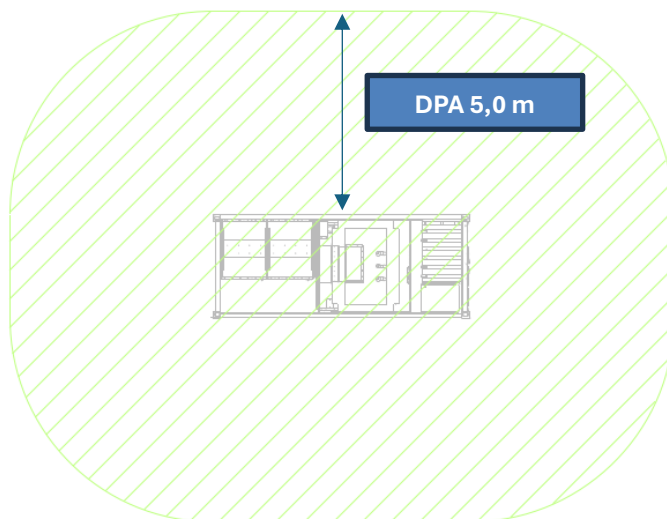


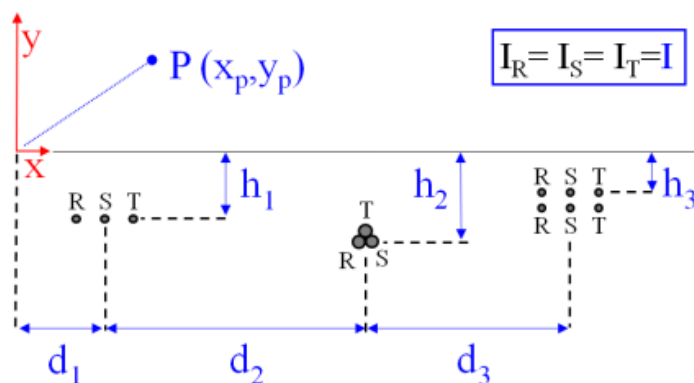
Figura 6-3 DPA per ogniabinato PCS

6.3 ELETTRODOTTO MT TRA CABINA DI CAMPO (CC) A CABINA DI RICEVIMENTO (CR)

I cabinati PCS saranno collegati in configurazione Entra-Esci, organizzati in gruppi (vedi doc. 22-040-PE-T01.1/.2 Schema elettrico unifilare MT/BT) a loro volta collegati alla rispettiva cabina di campo (CC). Tra ciascuna cabina “in testa” alla configurazione Entra-Esci e la cabina di campo si svilupperà un elettrodotto MT (30 kV) interrato con posa a trifoglio (cavo RG16H1R12 26/45 kV) con sezione 3x1x630 mm².

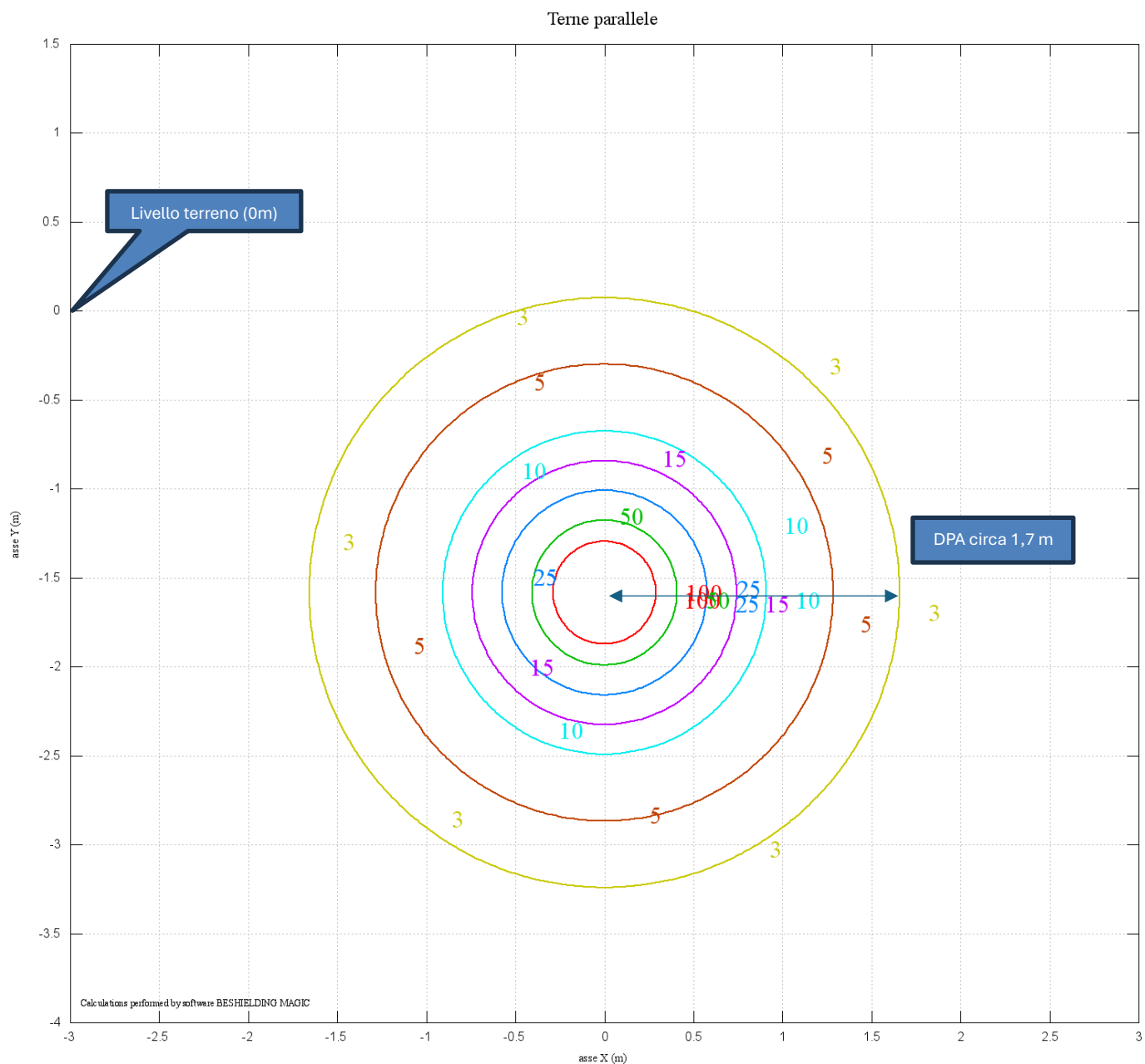
Viene proposta ora un'immagine d'esempio di modellizzazione tipica di elettrodotti, nel caso in esame si considererà:

- Elettrodotto MT: una terna di cavi con interrimento in posa a trifoglio

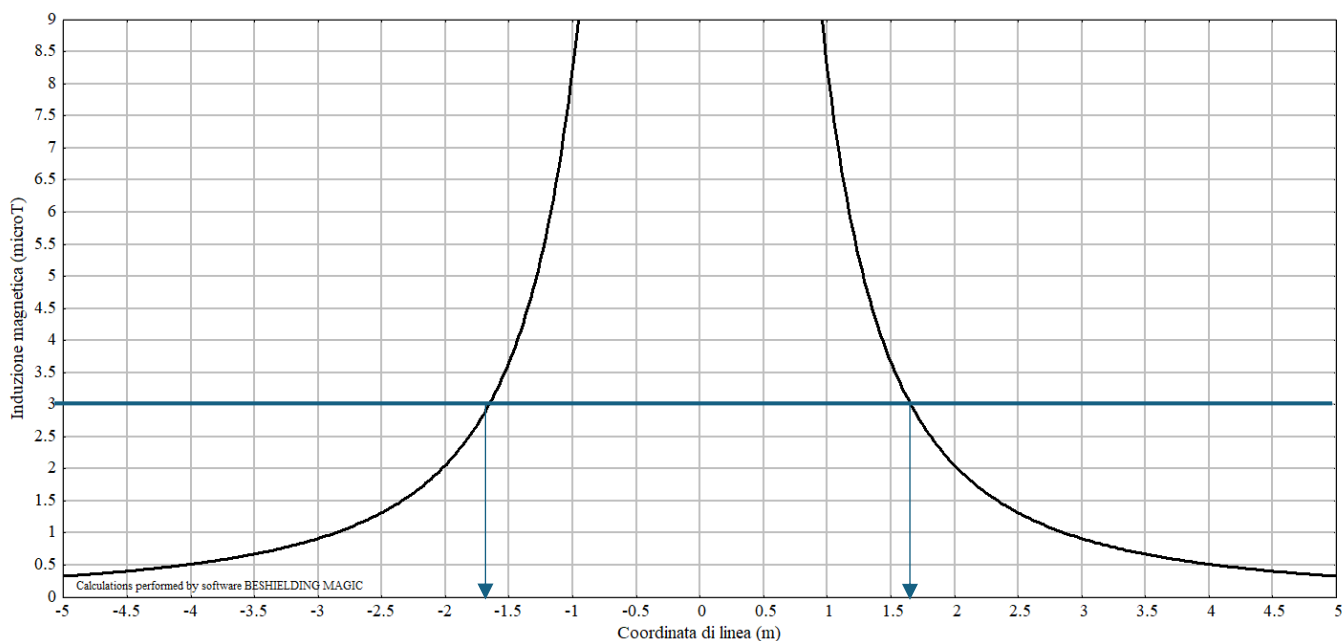


I cavidotti MT interno all'impianto sarà attraversato da una corrente di 580 A ed i conduttori di ogni terna a trifoglio disteranno 0,058m.

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

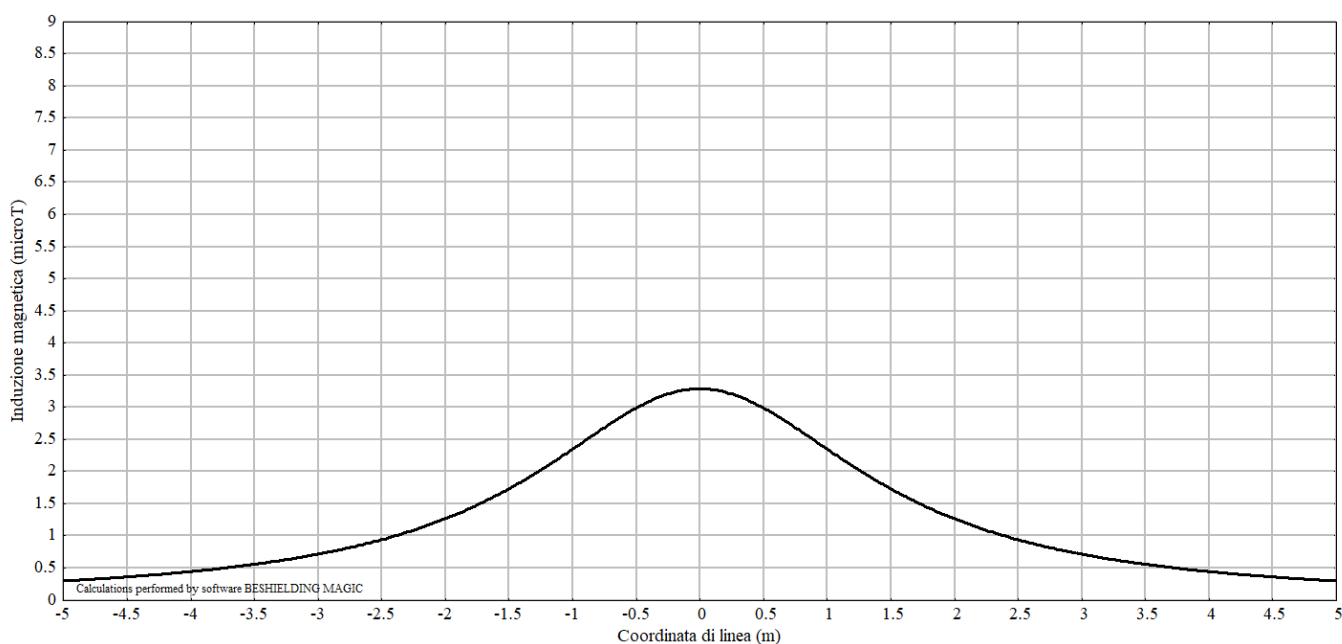


Questi risultati vengono confermati dal seguente grafico, in cui viene riportato l'andamento dell'induzione magnetica ad una quota fissa pari a $-1,60$ m.



Si considera pertanto una DPA pari a 2,0 m rispetto all'asse centrale del cavidotto, 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



Si noti come, in corrispondenza dell'asse del cavidotto (x: 0 m), il valore si attesta attorno a 3,3 μ T, per poi decrescere simmetricamente su ambo i lati.

6.4 CABINA DI CAMPO (CC)

Le cabine di campo (CC), raccoglieranno le linee elettriche provenienti dai gruppi di PCS in configurazione Entra-Esci. In esse saranno presenti n.1 trasformatore MT/bt 30/0,4-0,23KV (potenza nominale 160/200 kVA, isolato in resina) per consentire l'alimentazione dei servizi ausiliari all'impianto.

Per l'analisi dei campi elettromagnetici si considera la cabina di campo che gestirà la potenza maggiore, ovvero, che avrà la corrente più elevata.

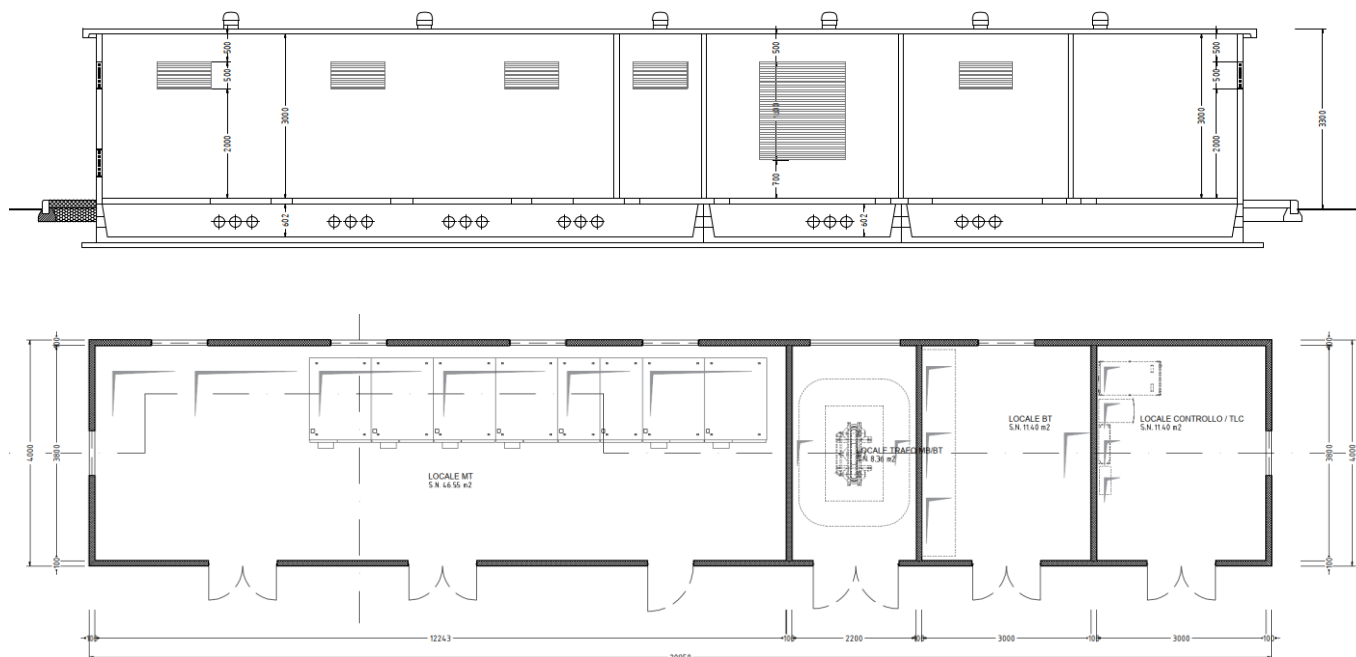


Figura 6-4 Cabina di campo viste in sezione e in pianta (CC)

Di seguito si riporta uno stralcio del DM 29/05/2008 in merito alla metodologia di calcolo delle DPA per le cabine:

“La metodologia di seguito riportata per l'individuazione delle distanze di prima approssimazione è da riferirsi a cabine di ultima generazione, realizzate secondo gli standard di riferimento nazionali; in particolare tale metodologia si applica a cabine tipo box (con dimensioni mediamente di 4 x 2.4 m, altezze di 2.4 e 2.7 m e trasformatore da 250-400-630 kVA), tipologia comunque tra le più diffuse sul territorio nazionale e di attuale realizzazione.

Per tipologie di cabine differenti, i soggetti tenuti al calcolo delle fasce dovranno valutare se alle tipologie delle cabine di progetto è applicabile la metodologia proposta: in caso contrario dovranno provvedere all'individuazione di specifiche fasce”.

Le cabine di campo in progetto differiscono significativamente da quella indicata nel sopracitato DM; dunque, si è provveduto all'individuazione delle DPA, determinate rispetto al filo esterno di parete, attraverso la simulazione dei campi magnetici indotti, mediante il software Magic della società Beshielding.

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

- Trasformatore MT/bt a servizio degli ausiliari;
- Quadri MT;
- Quadro bt.

Di seguito si illustra la disposizione delle apparecchiature all'interno della cabina e la geometria dei conduttori.

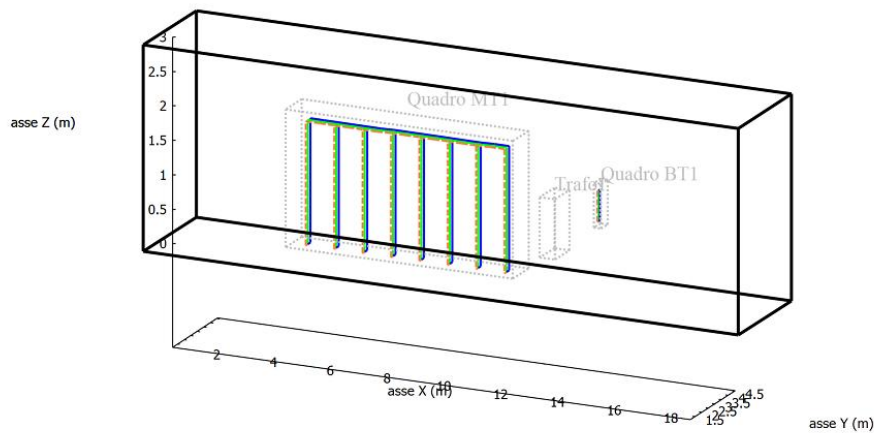
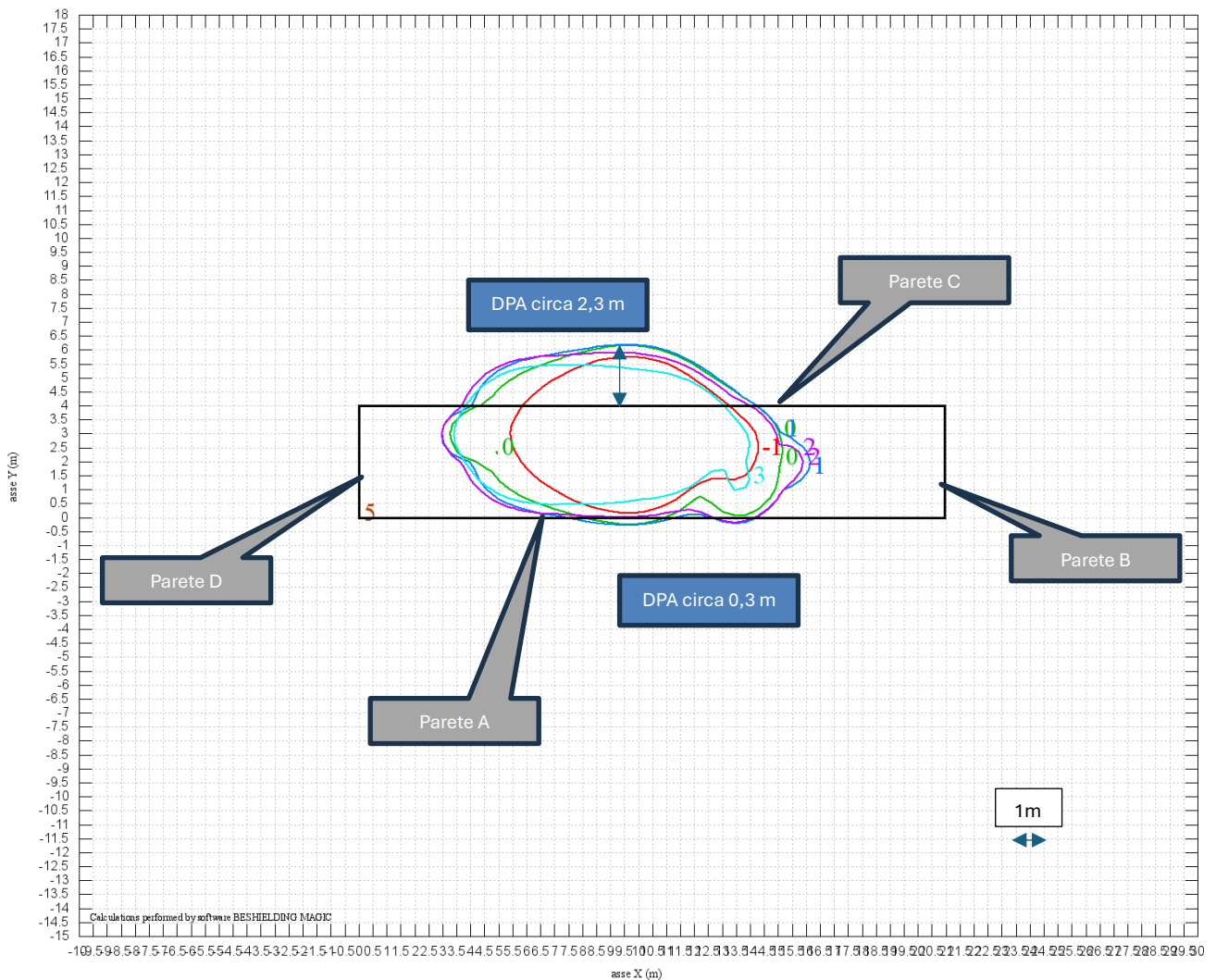


Figura 6-5 Disposizione apparecchiature all'interno delle Cabine di Campo

In maniera analoga alla determinazione della DPA nel cabinato PCS, si è determinato 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 $3\mu\text{T}$ (obiettivo di qualità).

Cabina - calcolo su piano xy - quote Z=-1,0,1,2,3,5 m, induzione magnetica = 3 uT



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

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 $3 \mu\text{T}$ esternamente alle pareti della cabina stessa:

- DPA rispetto alla parete A pari a circa 0,3 m;
- DPA rispetto alla parete B assente;
- DPA rispetto alla parete C pari a circa 2,3 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, ogni Cabina di Campo avrà una DPA di 3,0 m, da considerarsi dal filo esterno delle pareti della cabina.

Nella seguente immagine si rappresenta la situazione appena descritta.

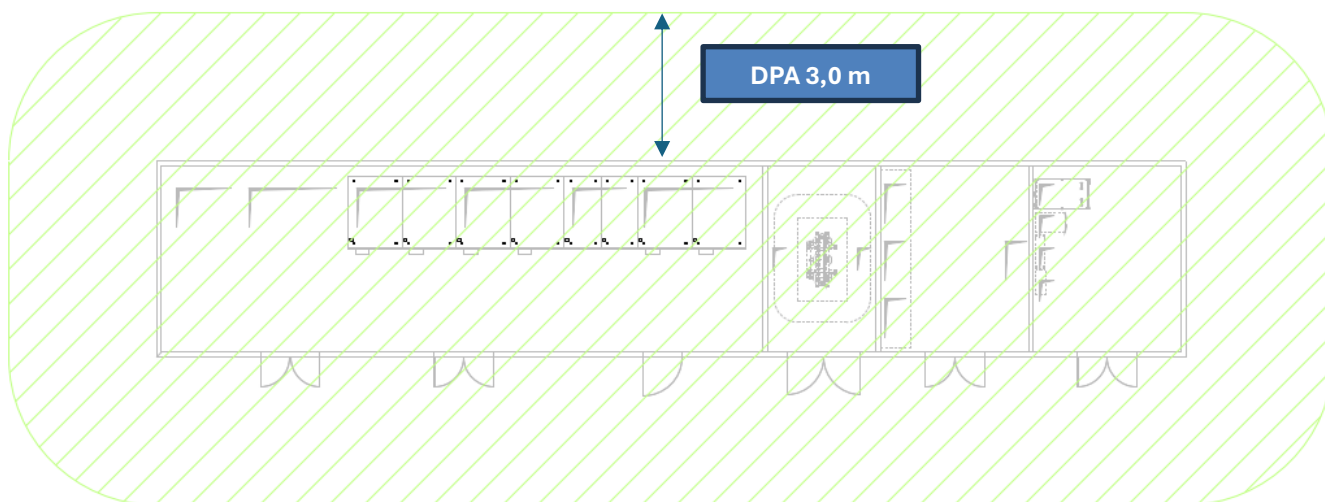


Figura 6-6 DPA per le Cabine di campo (CC)

6.5 CABINA DI RICEVIMENTO (CR)

La cabina di ricevimento (CR), raccoglierà le linee elettriche provenienti dalle cabine di campo ed inoltre opererà a sua volta da cabina di campo. In essa sarà presente, oltre agli scomparti MT e bt, n.2 trasformatori MT/bt 30/0,4-0,23KV (potenza nominale 160/200 kVA, isolato in resina) per consentire l'alimentazione dei servizi ausiliari all'impianto.

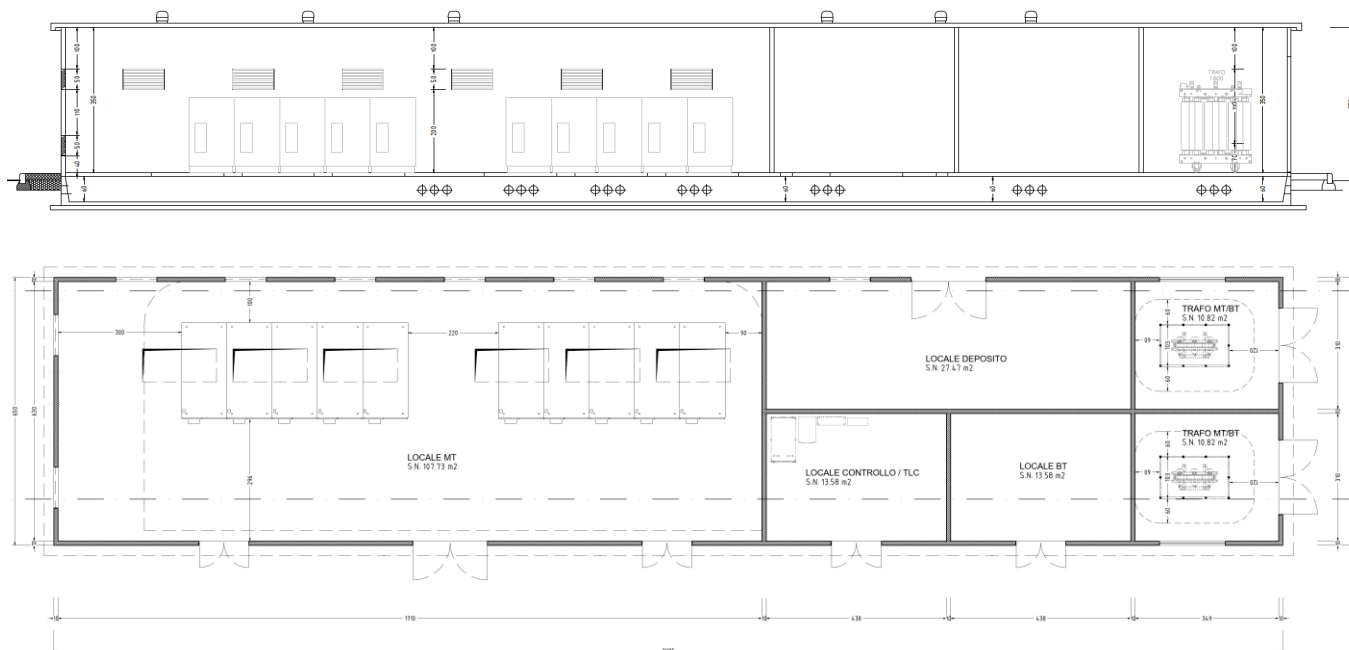


Figura 6-7 Cabina di ricevimento (CR), vista in sezione e in pianta

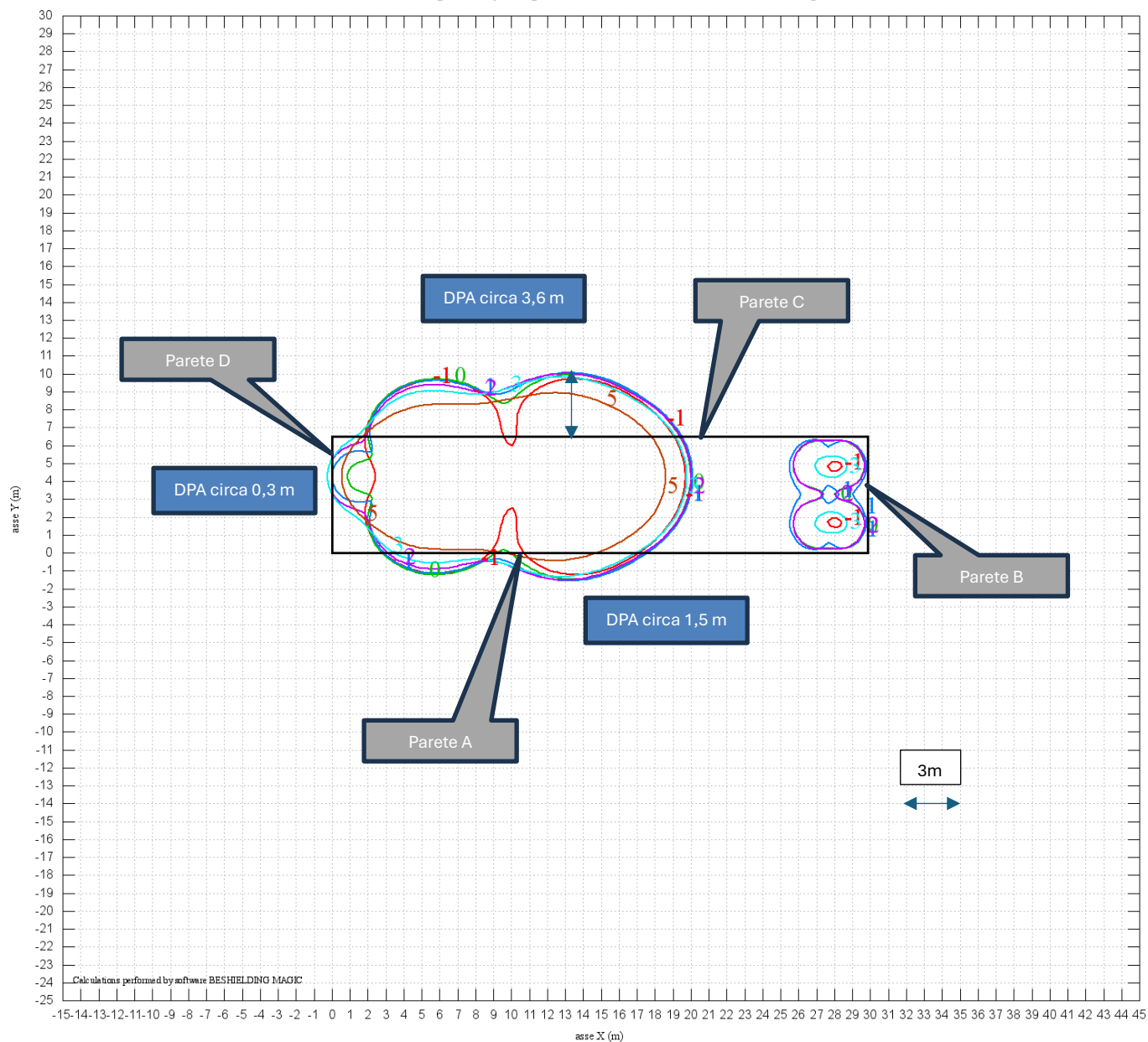
In questo caso, al fine di determinare l'area d'influenza del campo magnetico, sono stati considerati i seguenti componenti:

- N. 2 Quadri MT (Linee A e B, si veda documentazione di progetto)
- N. 2 trasformatori MT/bt.

Di seguito si rappresenta, a differenti 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 $3\mu T$ (obiettivo di qualità).

La modellazione è stata effettuata con il software MAGIC della società Beshielding.

Cabina - calcolo su piano xy - quote Z=-1,0,1,2,3,5 m, induzione magnetica = 3 uT



LEGENDA

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

Si individuano dunque le seguenti DPA rispetto ad ogni parete, indicando con le lettere A, B, C e D le quattro pareti della cabina:

- DPA rispetto alla parete A pari a circa 1,5 m;
- DPA rispetto alla parete B assente;
- DPA rispetto alla parete C pari a circa 3,6 m;
- DPA rispetto alla parete D pari a circa 0,3 m;

In modo analogo alle altre cabine in progetto, si indica come DPA il valore più alto arrotondando al metro successivo. In conclusione, la Cabina di Ricevimento avrà una DPA di 4,0 m, da considerarsi dal filo esterno delle pareti della cabina.

Nella seguente immagine si rappresenta la situazione appena descritta.

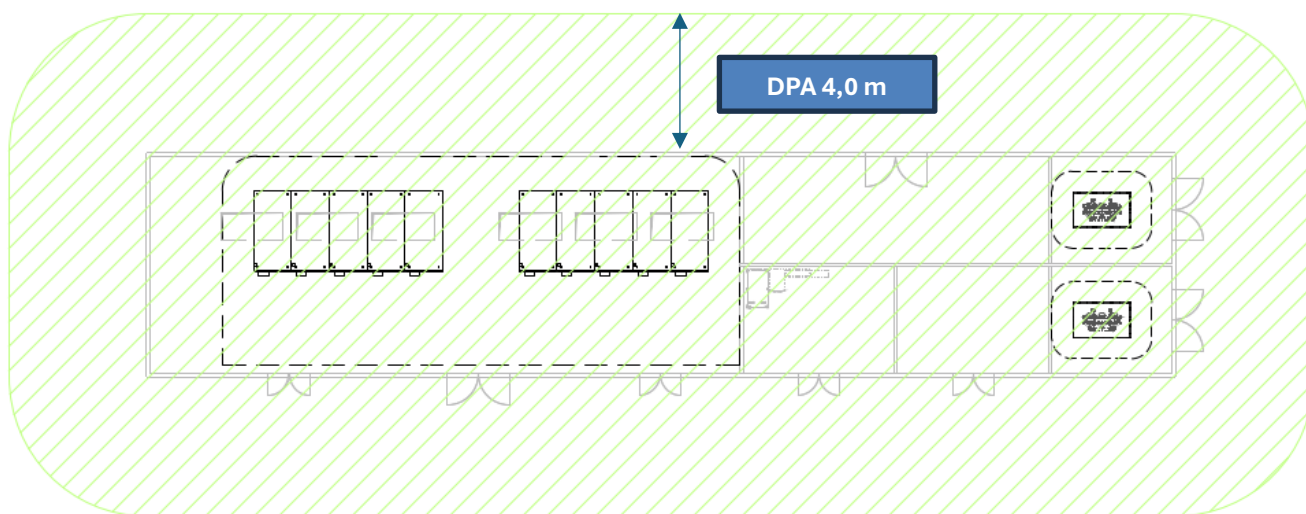


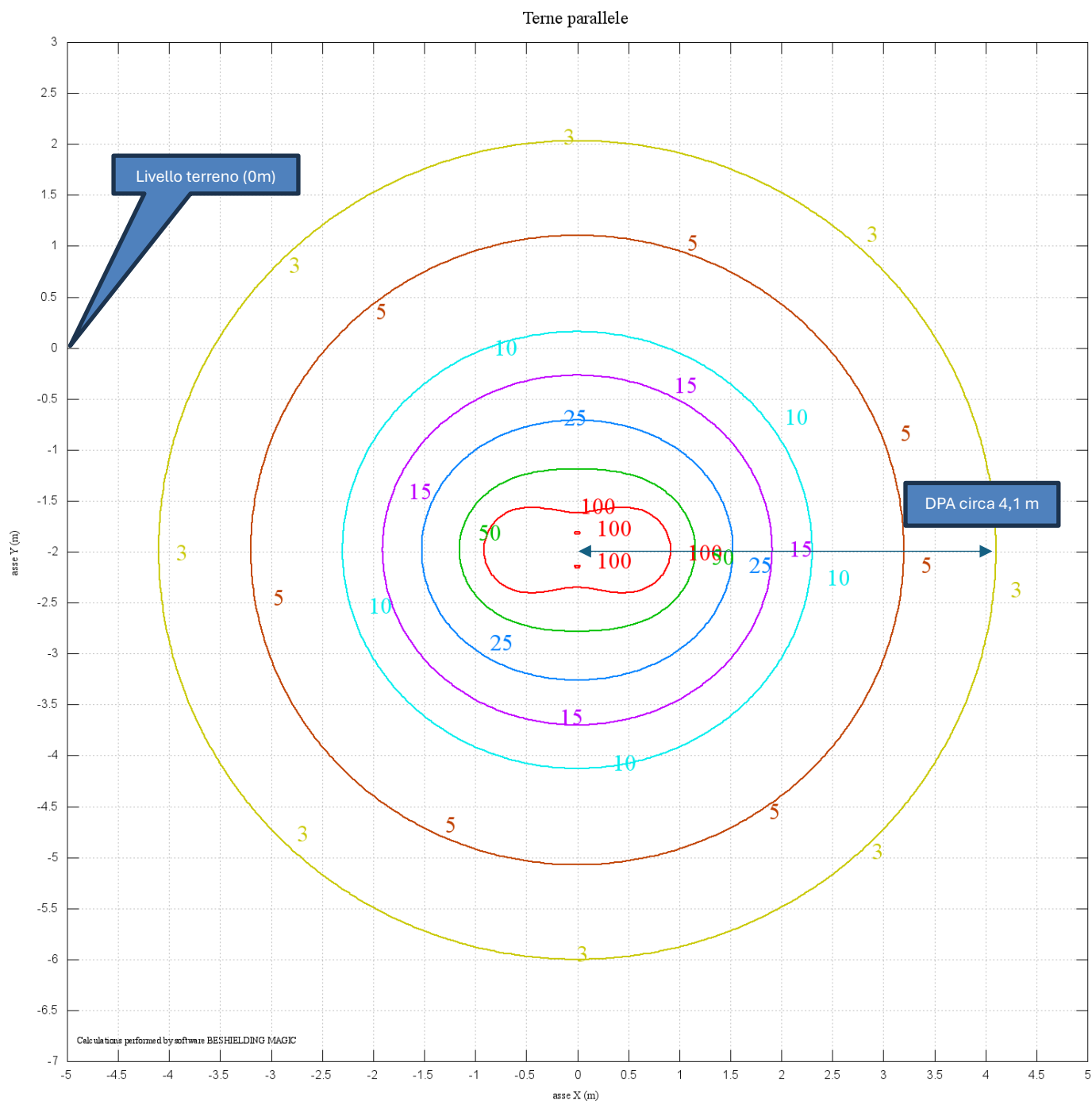
Figura 6-8 DPA per la Cabina di ricezione (CR)

6.6 ELETTRODOTTO MT CONNESSIONE (VERSO SSE)

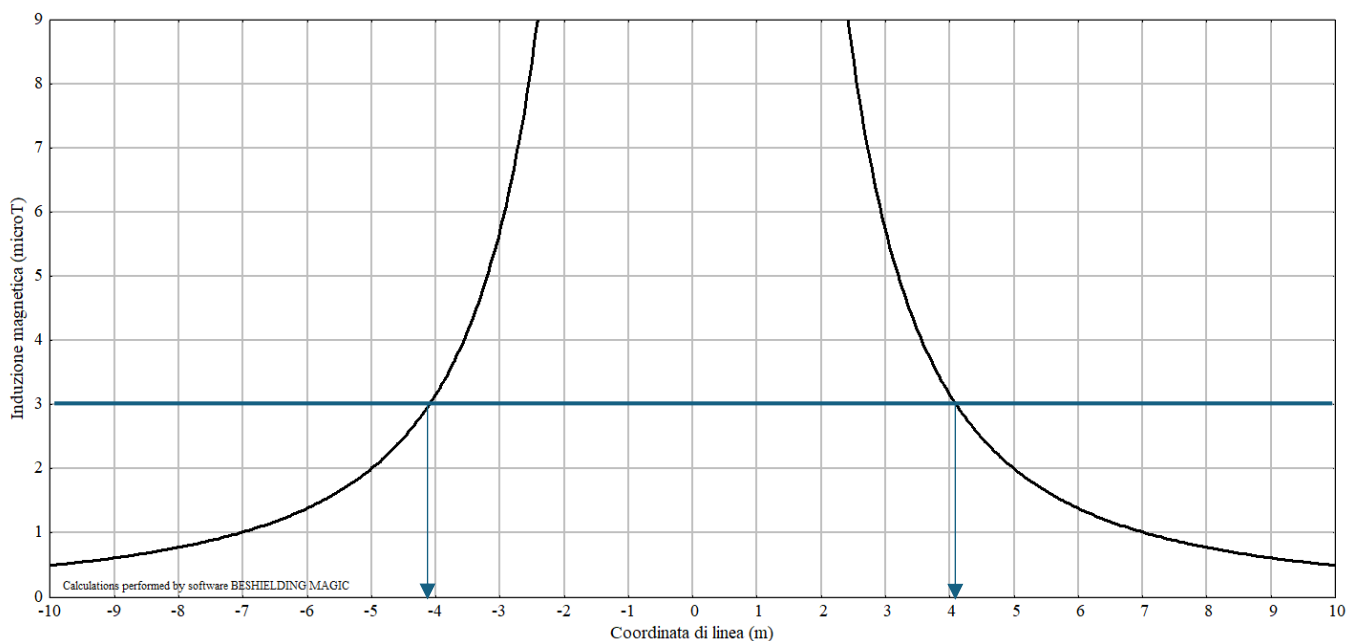
Dalla cabina di ricezione interna al perimetro dell'impianto diparte l'elettrodotto MT (30 kV) interrato, costituito da n. 6 terne di cavi, tipo RG16H1(O)R12 o RG7H1R 26/45 kV, che conduce alla SSE per la successiva connessione alla RTN.

Si prevede l'adozione di cavo di sezione 630mmq, perciò ogni terna presenterà una configurazione del tipo 3x1x630 mm².

Ai fini del calcolo della DPA, si considererà il cavidotto MT 30kV percorso da una corrente complessiva pari a 3480 A, suddivisa in maniera equa nelle sei terne. I conduttori per ogni terna saranno disposti a trifoglio ad una distanza di 0,058 m. I risultati ottenuti vengono riportati nel seguente grafico rappresentante le curve per fissato valore di induzione elettromagnetica (unità di misura μT).

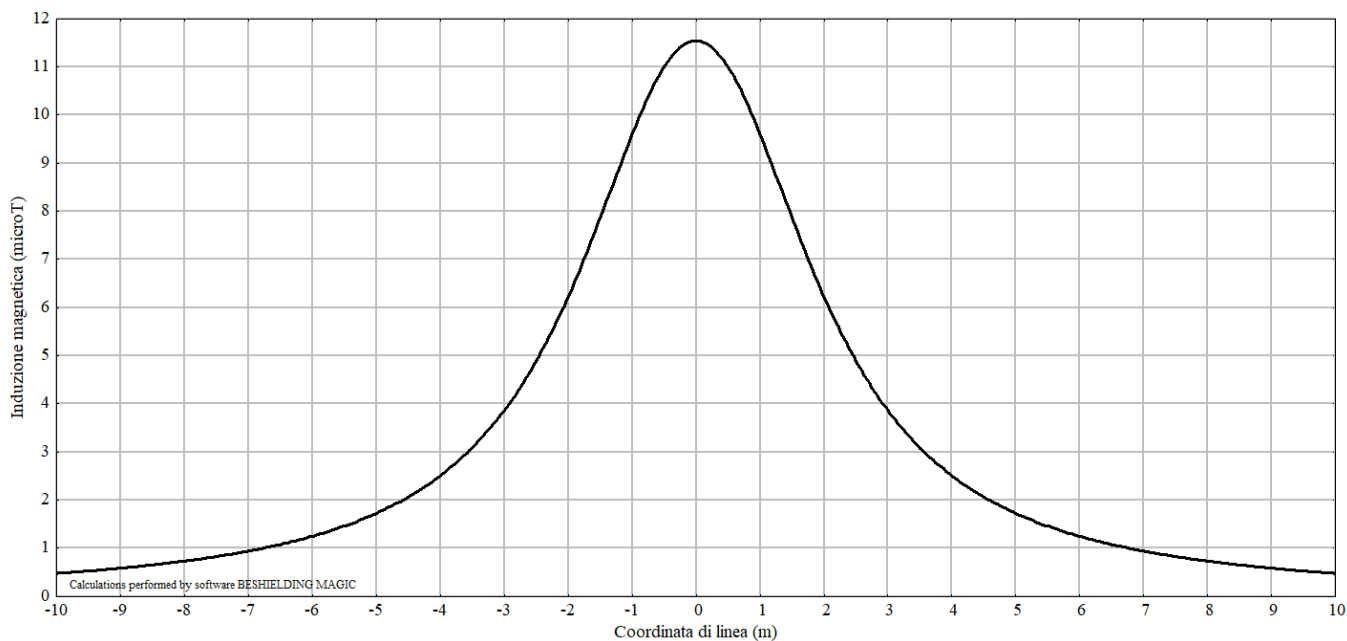


Questi risultati vengono confermati dal seguente grafico, in cui viene riportato l'andamento dell'induzione magnetica ad una quota fissa pari a -2,0 m.



Dunque, al fine di fornire risultati maggiormente cautelativi, approssimando al metro successivo, si considera una DPA pari a 5,0 m rispetto all'asse centrale della sezione, quindi la fascia di rispetto avrà un'ampiezza sul piano complessiva pari a 10,0 m.

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



Si noti come, in corrispondenza dell'asse del cavidotto (x: 0 m), il valore si attesta attorno a 11,5 μ T, per poi decrescere simmetricamente su ambo i lati.

6.6.1 GIUNTI

Il cavidotti MT 30 kV che dall'impianto agrivoltaico giunge alla SSE avrà una lunghezza pari a circa 3,5 km. 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.

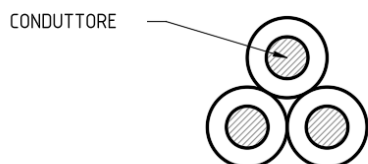


Le giunzioni saranno posizionate lungo il percorso del cavidotto, ogni 500-1000 m.

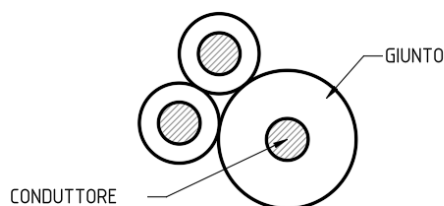
I singoli giunti unipolari andranno posizionati opportunamente sfasati l'uno dall'altro al fine di evitare effetti cumulativi di campo magnetico. Il posizionamento dei giunti sarà determinato in sede di progetto esecutivo in funzione della lunghezza delle pezzature del cavo e della tipologia di giunti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

Al fine di valutare la variazione del campo magnetico in corrispondenza di ogni giunto unipolare, è stata modellata 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.

DISPOSIZIONE DEI CAVI
A TRIFOGLIO



DISPOSIZIONE DEI CAVI IN
CORRISPONDENZA DI UN GIUNTO



Le risultanze emerse dalle simulazioni sono le seguenti:

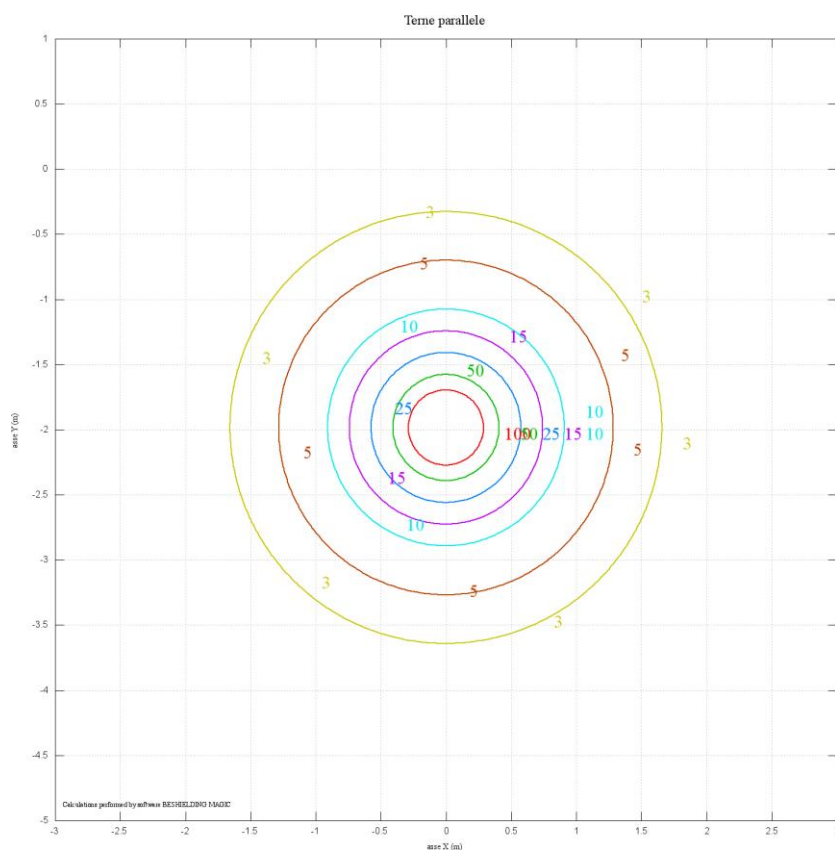


Figura 9 Campo magnetico terna MT singola con posa a trifoglio

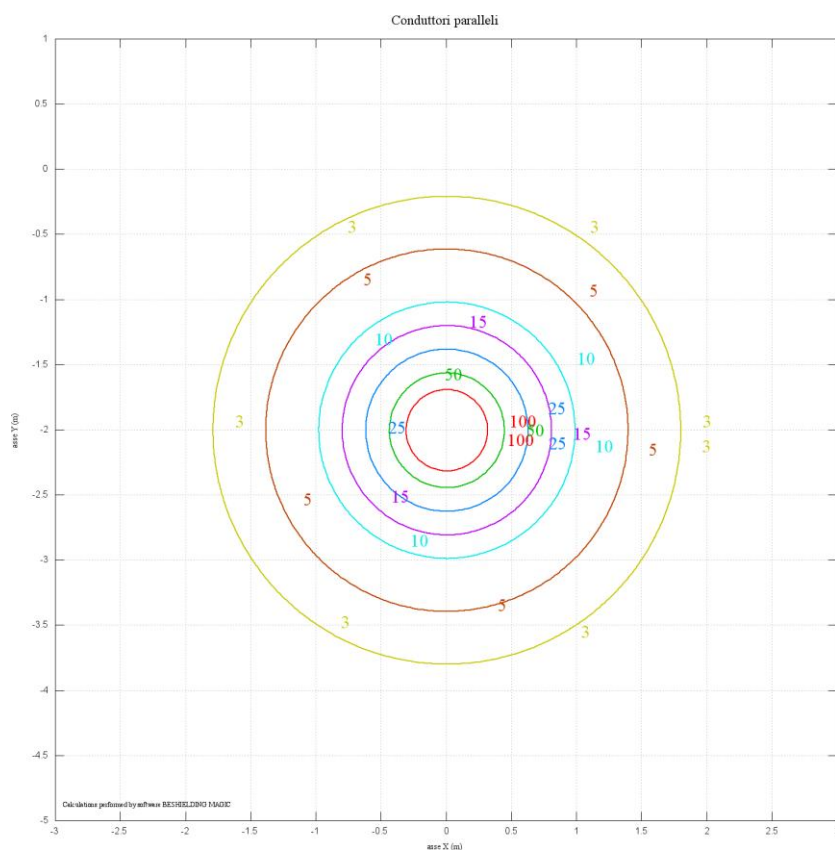


Figura 10 Campo magnetico terna MT singola con posa a trifoglio in presenza di giunto

Si evince che, nel secondo caso, la curva che indica un valore di campo magnetico pari a $3 \mu\text{T}$ risulta più ampia di circa 0,15 m per parte, contributo 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.

7 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:
 - 5,0 m da considerarsi dal filo esterno di ogni cabinato PCS;
 - 3,0 m da considerarsi dal filo esterno delle Cabine di Campo;
 - 4,0 m da considerarsi dal filo esterno della Cabina di Ricevimento.

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.

- I valori di campo magnetico generato dai tratti di elettrodotto interrato MT 30 kV che vanno dalle Cabine di campo (CC) alla Cabina di ricevimento (CR), risultano contenuti e tali per cui la fascia di rispetto ha ampiezza complessiva pari a 4 m rispetto all'asse centrale del cavidotto;
- I valori di campo magnetico generato dal cavidotto di connessione MT 30 kV interrato, che diparte dalla Cabina di ricevimento, e percorrendo parallelamente Via Canale Bastione, giunge alla SSE (in fase di valutazione ambientale/autorizzazione), risultano contenuti e tali per cui la DPA ha ampiezza massima pari a 5 m per parte rispetto all'asse dell'elettrodotto, quindi l'elettrodotto avrà una fascia di rispetto di ampiezza complessiva pari a 10 m.
- Per l'elettrodotto MT 30 kV tra impianto ed SSE, 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

Si conclude inoltre che tutte le DPA individuate per apparecchiature fonti di campi elettromagnetici, interne all'impianto, sono contenute ampiamente all'interno dei confini dello stesso.

8 ALLEGATI

- Documento di Validazione – Algoritmi di calcolo del software MAGIC[®] (MAGnetic Induction Calculation)

Documento di Validazione

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

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

Sommario

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

1. Premessa

Il presente documento riporta le verifiche funzionali del software MAGIC® attraverso il confronto con software già esistenti e di comprovata validità e con rilievi sperimentali.

Il confronto si sviluppa in tre parti:

- 1) verifica del modulo bidimensionale
- 2) verifica del modulo tridimensionale
- 3) verifica del modulo tridimensionale di configurazioni impiantistiche con particolare riferimento al trasformatore di potenza

Le principali caratteristiche del software MAGIC® sono:

- a) software bi-tridimensionale
- b) integrazione della formula di Biot-Savart
- c) dominio infinito (nessuna condizione al contorno necessaria)
- d) trascurati effetti di mitigazione del campo dovuto a schermatura di fatto (analisi conservativa)
- e) sovrapposizione degli effetti
- f) analisi in regime simbolico (calcolo dei moduli e delle fasi)

Il software è stato sviluppato da tecnici specializzati con la collaborazione e la supervisione di docenti e ricercatori del Politecnico di Torino – Dipartimento Energia (prof. Aldo Canova e Ing. Luca Giaccone).

2. Verifica del modulo bidimensionale

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

2.1. Confronto con CEI 211-04

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

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

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

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}_l 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.

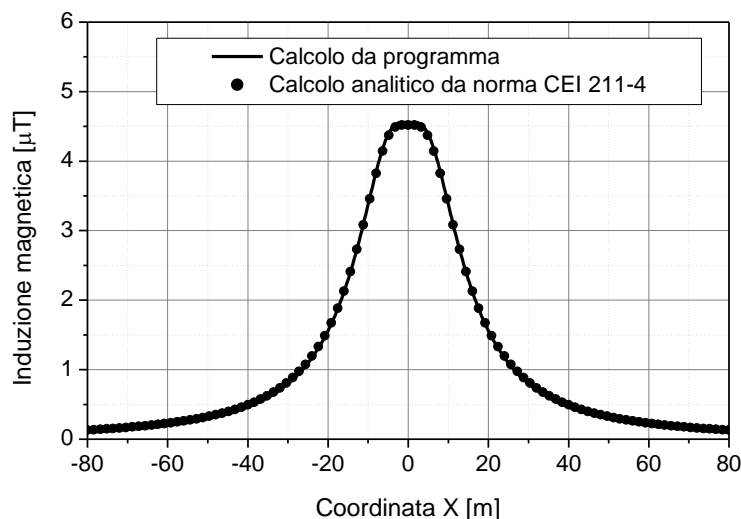


Figure 1 Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

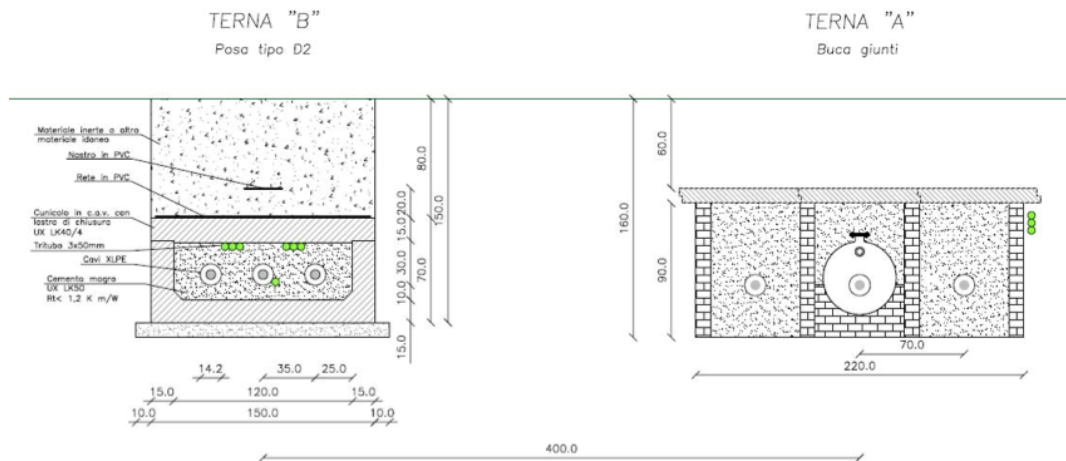


Figure 2 Affiancamento tra due linee interrate AT

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.

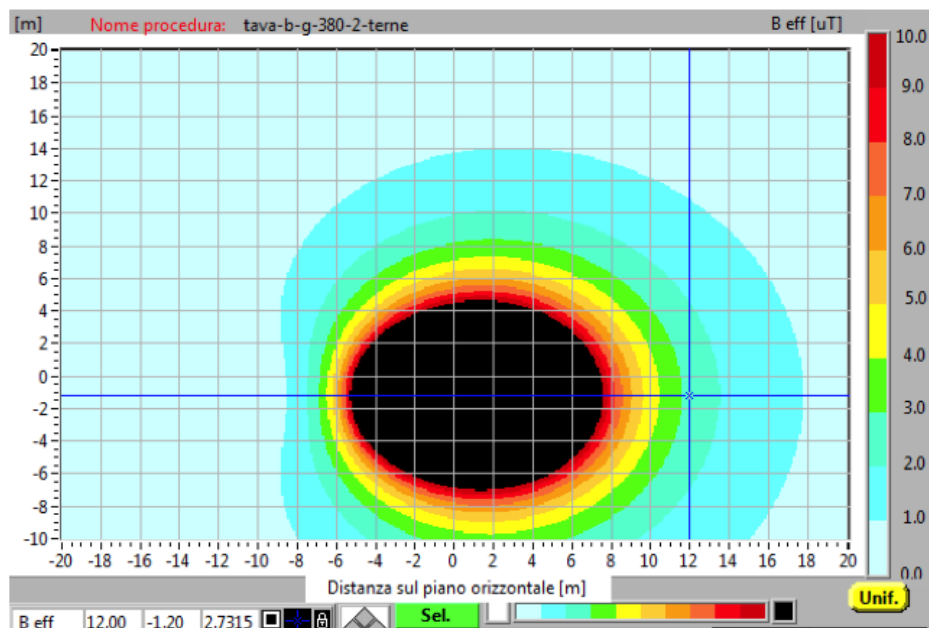


Figure 3 Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.

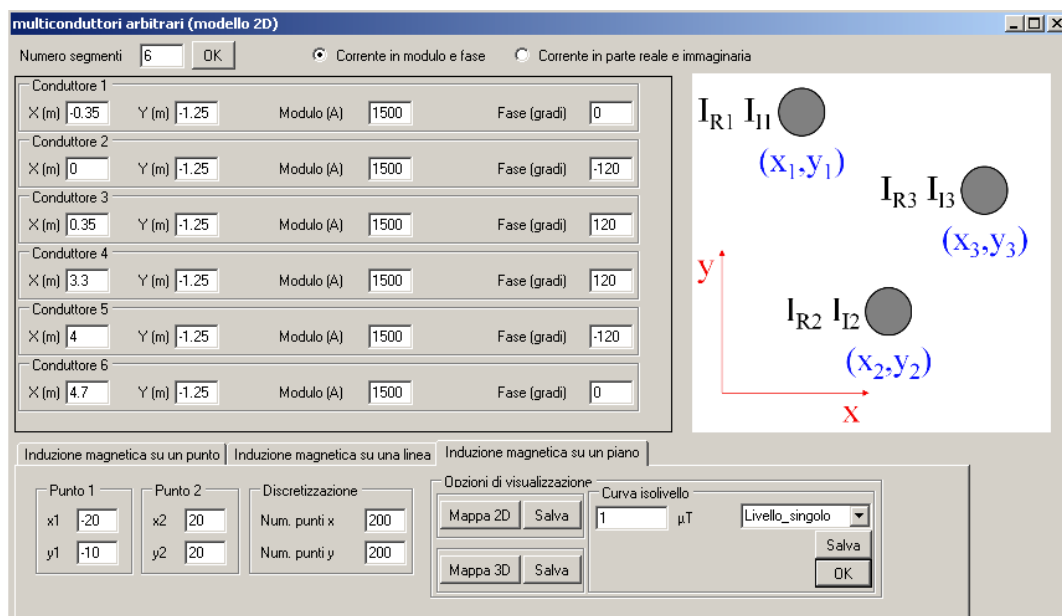


Figure 4 Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)”: dati definizione geometria e sorgenti

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

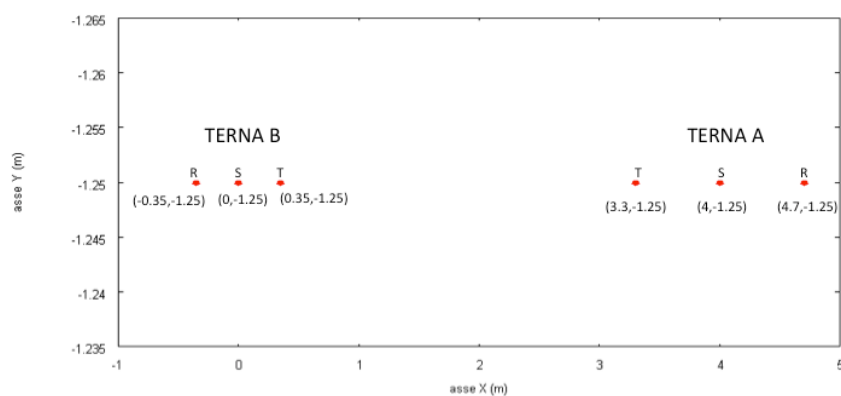


Figure 5 Geometria sorgenti

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

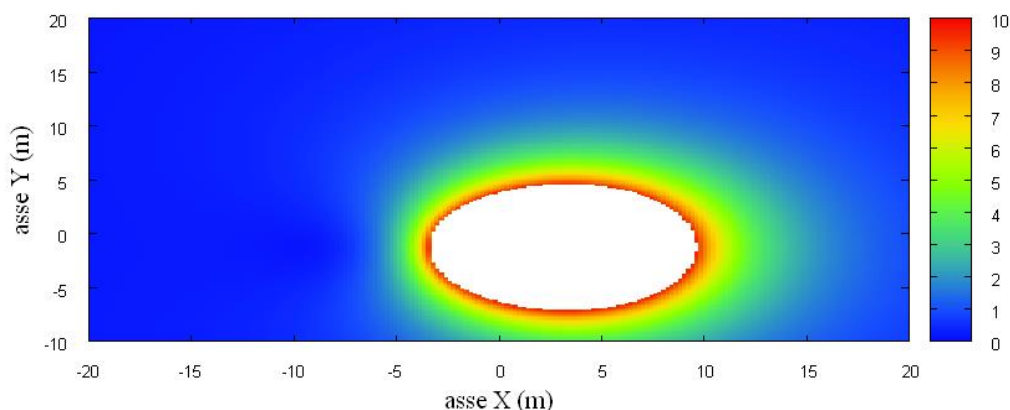


Figure 6 Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

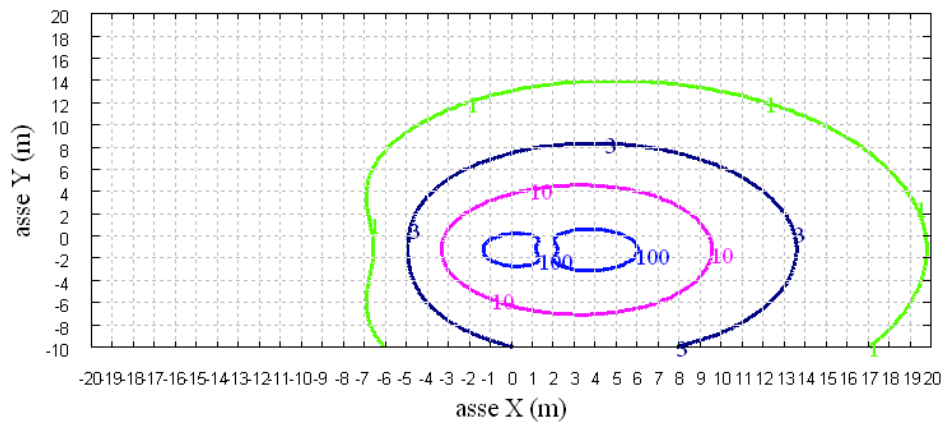


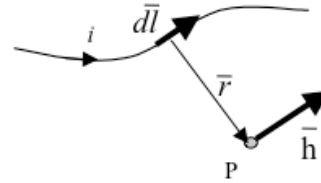
Figure 7 Linee isolivello dell'induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®

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:

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



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.

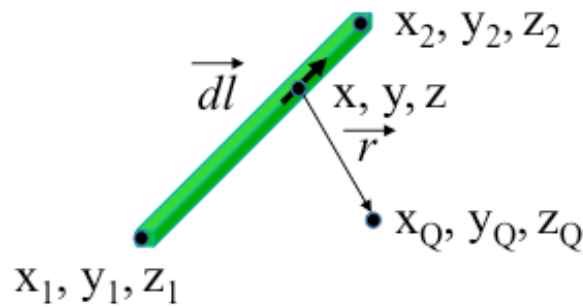


Figure 8 Modello del segmento.

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:

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

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

Facendo le opportune sostituzioni, la formula di Biot-Savart può essere risolta conducendo ad una formula chiusa per il calcolo delle tre componenti di campo H_x , H_y e H_z (ovvero B_x , B_y e B_z). L'integrazione, sebbene sia macchinosa e porti ad espressioni analitiche poco compatte, può essere semplicemente risolta mediante l'utilizzo di un processore simbolico. Per tutti i dettagli circa l'integrazione si consideri la seguente referenza:

Canova A.; F. Freschi; M. Repetto; M. Tartaglia, (2005), *Description of Power Lines by Equivalent Source System*. In: COMPEL, vol. 24, pp. 893-905. - ISSN 0332-1649

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.

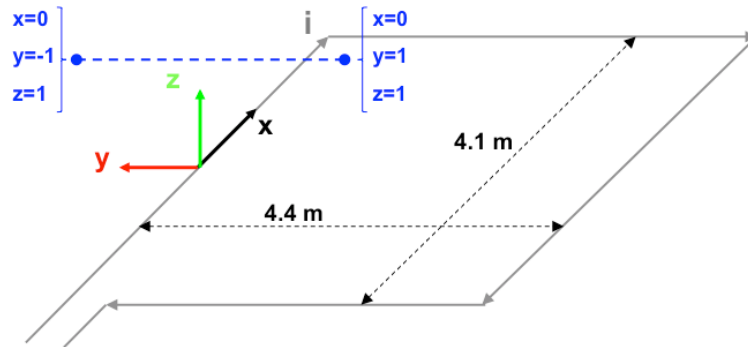


Figure 9 Schema di spira quadrata.

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 → $x = \text{costante} = 0\text{ m}$
- E' 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.

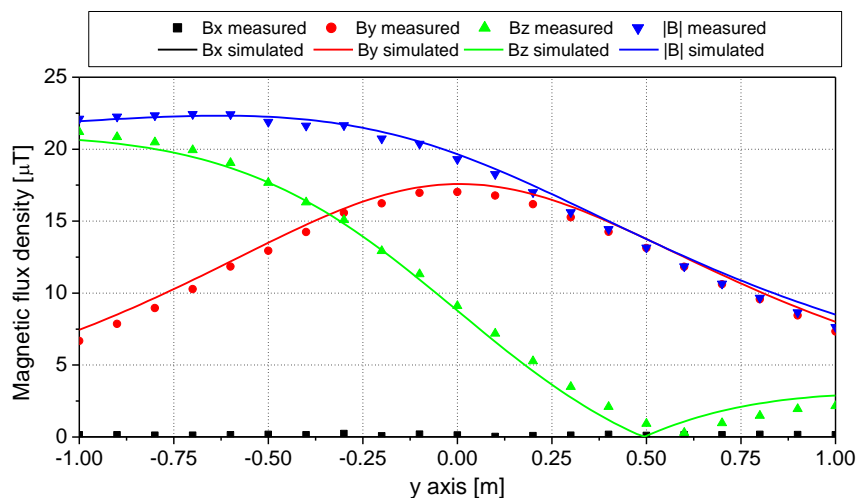


Figure 10 Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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.

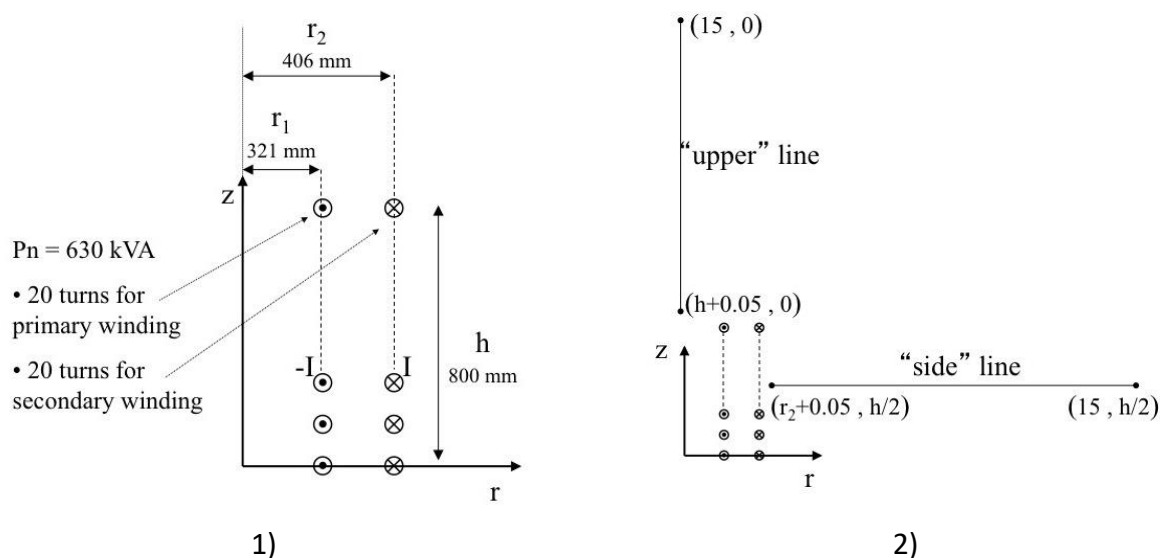


Figure 11 Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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).

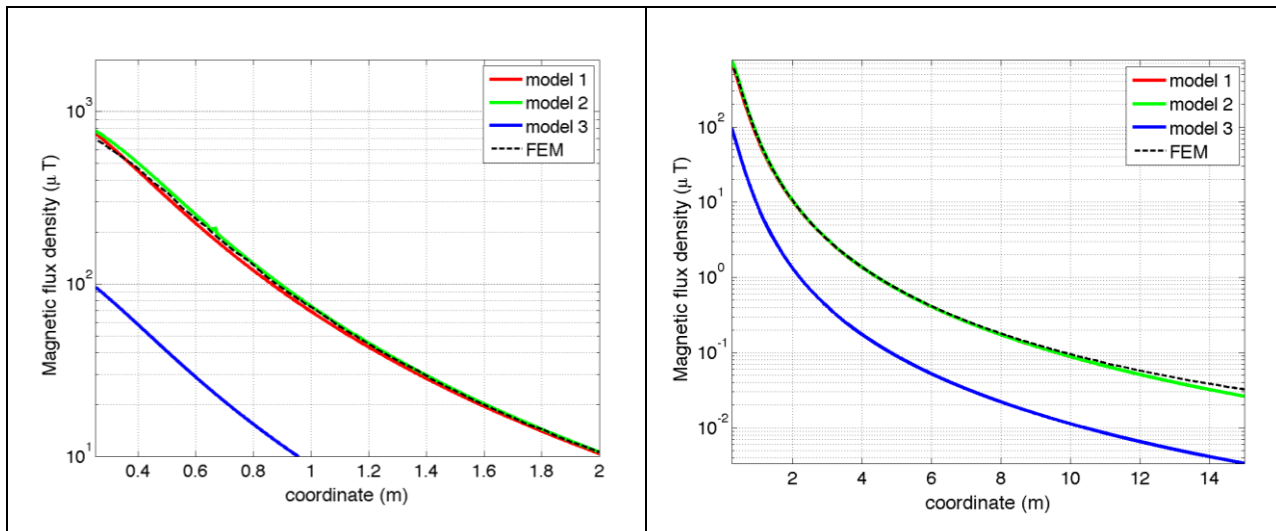


Figure 12 Induzione magnetica lungo la linea laterale

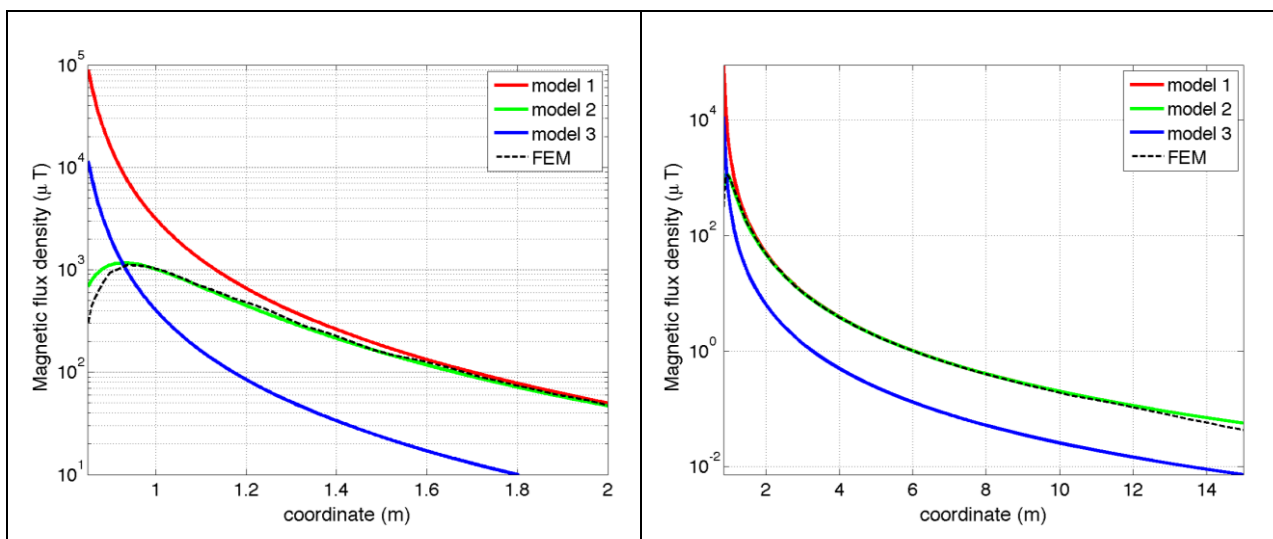


Figure 13 Induzione magnetica lungo la linea superiore

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.

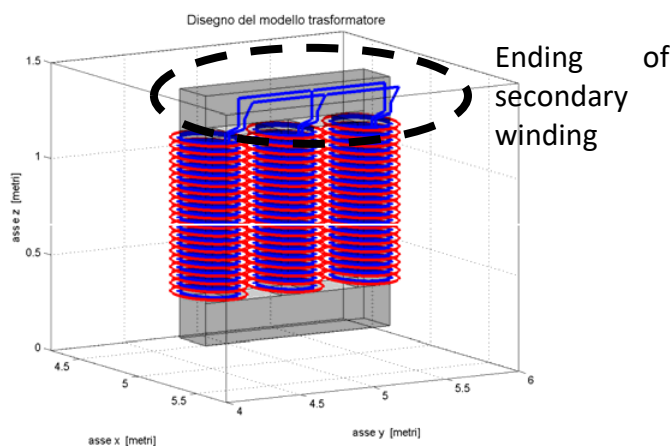


Figure 14 Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

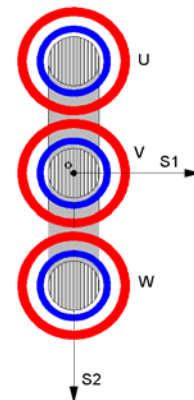


Figure 15 Linee di calcolo S1 ed S2

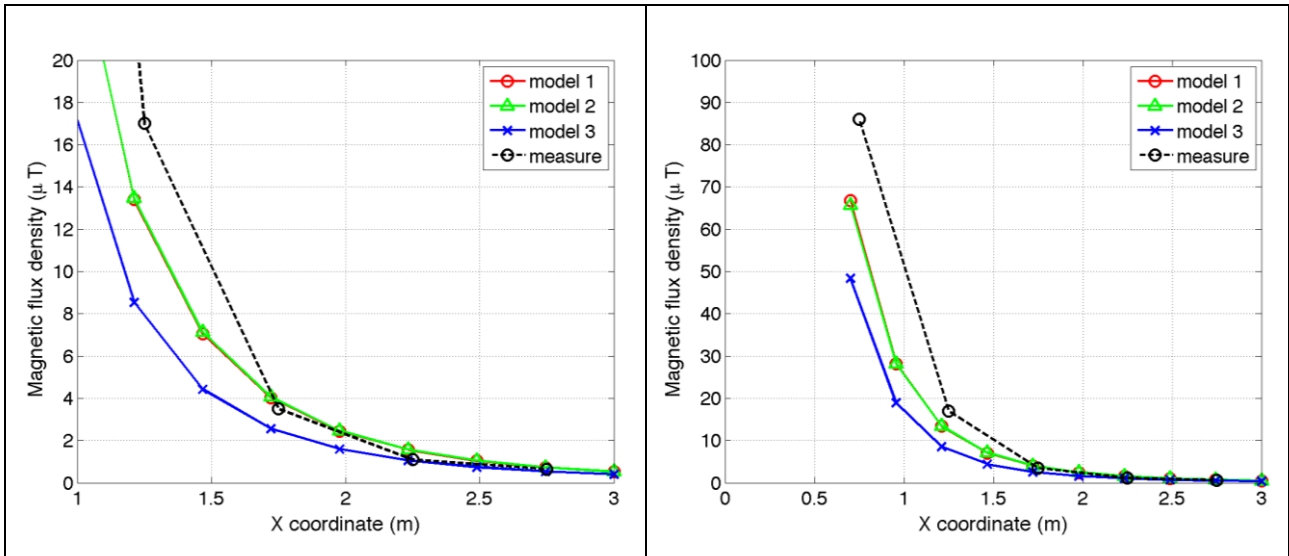


Figure 16 Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

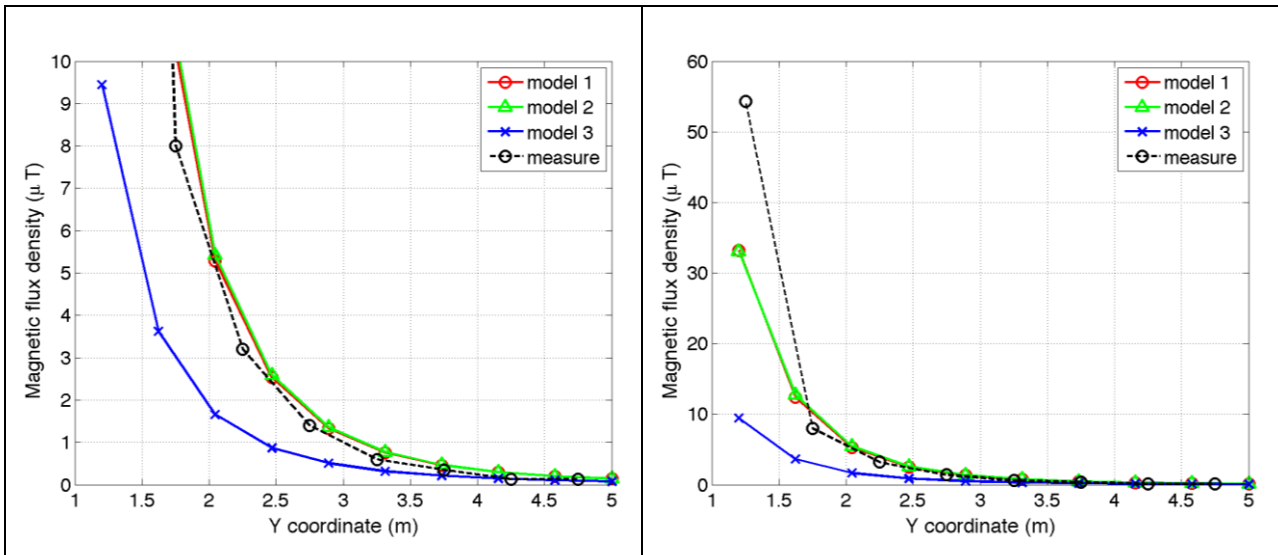


Figure 17 Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

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.