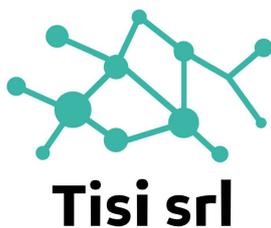


IMPIANTO AGRIVOLTAICO "SERRAMANNA 2"

COMUNE DI SERRAMANNA

PROPONENTE



IMPIANTO AGRIVOLTAICO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA DA FONTE SOLARE NEL COMUNE DI SERRAMANNA

PROGETTO DEFINITIVO

OGGETTO:

Relazione tecnica campi elettromagnetici BT/MT lato produzione

CODICE ELABORATO

PD
R05a

COORDINAMENTO



BIA srl

P.IVA 03983480926
cod. destinatario KRRH6B9
+ 39 347 596 5654
energhiabia@gmail.com
energhiabia@pec.it
piazza dell'Annunziata n. 7
09123 Cagliari (CA) | Sardegna

GRUPPO DI LAVORO A.U.

Dott.ssa Geol. Cosima Atzori
Dott.ssa Ing. Silvia Exana
Dott.ssa Ing. Ilaria Giovagnorio
Dott. Ing. Bruno Manca
Dott. Ing. Giuseppe Pili
Dott. Ing. Michele Pigliaru
Dott.ssa Ing. Alessandra Scalas

REDATTORE

Dott. Ing. Giuseppe PILI
Dott. Ing. Michele PIGLIARU

| | | |
|------|--------------|-----------------------|
| 00 | Ottobre 2022 | Prima emissione |
| REV. | DATA | DESCRIZIONE REVISIONE |

Sommario

| | |
|--|----|
| 1. GENERALITÀ..... | 3 |
| 1.1 Descrizione del progetto..... | 3 |
| 1.1 Tipo e ubicazione dell'immobile..... | 3 |
| 1.2 Caratteristiche generali..... | 3 |
| 2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO..... | 6 |
| 3. FONTI DI EMISSIONE..... | 6 |
| 3.1 Elettrodotto 36 kV..... | 7 |
| 3.2 Cabine di campo..... | 9 |
| 3.3 Cabine di sottocampo..... | 9 |
| 4. VALORI LIMITE DI RIFERIMENTO..... | 9 |
| 4.1 Valori limite del campo magnetico..... | 10 |
| 4.2 Valori limite del campo elettrico..... | 10 |
| 5. CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DAGLI ELETTRODOTTI 36 kV..... | 10 |
| 6. CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DALLE CABINE DI CAMPO..... | 12 |
| 7. CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DALLE CABINE DI SOTTOCAMPO..... | 12 |
| 8. CONCLUSIONI..... | 13 |
| 8.1 – Elettrodotti 36 kV..... | 13 |
| 8.2 – Cabine di campo..... | 13 |
| 8.1 – Cabine di sottocampo..... | 13 |
| 9. APPENDICE..... | 14 |
| 9.1 Curve isolivello induzione magnetica nell'intorno della cabina di campo tipo..... | 14 |
| 9.2 Curve isolivello induzione magnetica nell'intorno della cabina di sottocampo tipo..... | 16 |
| 9.3 Documento di validazione software di calcolo..... | 19 |

1. GENERALITÀ

1.1 Descrizione del progetto

La presente relazione descrittiva riguarda la valutazione dei campi elettromagnetici (radiazioni non ionizzanti) relativi ad una centrale agrovoltaica per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile solare denominata "Serramanna 2" con una potenza di picco nominale di **27136,2 kWp**.

L'impianto sarà del tipo grid-connected e l'energia elettrica prodotta sarà riversata completamente in rete, salvo gli autoconsumi di centrale, con connessione alla rete di trasmissione in Alta Tensione a 150 kV mediante cabina di trasformazione MT/AT, di competenza del proponente, collegata in antenna a 150 kV sul futuro ampliamento della stazione elettrica di smistamento (SE) della RTN 150 kV di Serramanna, previo potenziamento/rifacimento della linea RTN a 150 kV "Villasor - Villacidro" di proprietà di Terna S.p.A.

Gli impianti elettrici lato impianto sono trattati nella relazione specialistica PD-R03 - Relazione tecnica impianti elettrici lato produzione.

La Sottostazione Elettrica Utente (nel seguito SSEU) sarà trattata nel documento di progetto PD-04 - Relazione tecnica impianti elettrici lato connessione.

Il progetto è redatto secondo le norme CEI ed in conformità a quanto indicato nelle prescrizioni di Terna S.p.A.

1.1 Tipo e ubicazione dell'immobile

L'impianto agrovoltaico è localizzato nel Comune di Serramanna (SU).

La cabina di trasformazione AT/MT (SSEU) si trova nel comune di Serramanna (SU).

1.2 Caratteristiche generali

L'impianto è suddiviso in 3 campi corrispondenti a **tre linee MT a 36 kV ARE4H5EX in cavo tripolare elicordato interrato** che collegano l'impianto alla sottostazione MT/AT (SSEU). Ciascun campo è ulteriormente diviso in sottocampi secondo il seguente schema:

- Campo fotovoltaico 1:
 - Sottocampo 1-1
 - Sottocampo 1-2
 - Sottocampo 1-3
 - Sottocampo 1-4
 - Sottocampo 1-5
- Campo fotovoltaico 2:
 - Sottocampo 2-1

- Sottocampo 2-2
- Sottocampo 2-3
- Sottocampo 2-4
- Sottocampo 2-5
- Campo fotovoltaico 3:
 - Sottocampo 3-1
 - Sottocampo 3-2
 - Sottocampo 3-3
 - Sottocampo 3-4
 - Sottocampo 3-5

Ciascun campo fotovoltaico fa capo ad una cabina MT/BT (cabina di campo) contenente un quadro MT 36 kV che raccoglie le linee interrate a 36 kV provenienti dai sottocampi. In ogni cabina di campo è inoltre installato un trasformatore MT/BT 36kV/400V da 100 kVA e un quadro di BT per l'alimentazione dei servizi ausiliari del campo stesso. Sono previste 3 cabine di campo. Ciascun sottocampo fotovoltaico è alimentato da una cabina MT/BT (cabina di sottocampo) contenente al suo interno un quadro MT 36 kV, un trasformatore MT/BT 36 kV/800V da 2000 kVA e un quadro BT. Dal quadro BT sono alimentati gli inverter da 200 kWac dislocati in campo. All'interno di ciascun campo le cabine di sottocampo sono collegate a stella alla rispettiva cabina di campo mediante linee **MT a 36 kV ARE4H5EX in cavo tripolare elicordato interrato**. Sono presenti in totale 15 cabine di sottocampo.

I moduli fotovoltaici, ciascuno con potenza nominale di picco pari a 700 Wp, saranno raggruppati in stringhe da 26 moduli.

Alla cabina di campo 1 sono sottese 5 cabine di sottocampo secondo il seguente schema:

| CAMPO FOTOVOLTAICO 1 | | | | |
|-------------------------|---------------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------|
| SOTTOCAMPI FOTOVOLTAICI | N. INVERTER /CABINA | POTENZA NOMINALE AC/CABINA | POTENZA MAX AC CABINA (cosφ=1) | POTENZA TRAF0 MT/BT |
| SOTTOCAMPO 1-1 | 9 | 1800 kW | 1935 kVA | 2000 kVA |
| SOTTOCAMPO 1-2 | 9 | 1800 kW | 1935 kVA | 2000 kVA |
| SOTTOCAMPO 1-3 | 9 | 1800 kW | 1935 kVA | 2000 kVA |
| SOTTOCAMPO 1-4 | 9 | 1800 kW | 1935 kVA | 2000 kVA |
| SOTTOCAMPO 1-5 | 9 | 1800 kW | 1935 kVA | 2000 kVA |

Alla cabina di campo 2 sono sottese 5 cabine di sottocampo secondo il seguente schema:

| CAMPO FOTOVOLTAICO 2 | | | | |
|-------------------------|---------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------|
| SOTTOCAMPI FOTOVOLTAICI | N. INVERTER /CABINA | POTENZA NOMINALE AC/CABINA | POTENZA MAX AC CABINA (cosφ=1) | POTENZA RTRAF0 MT/BT |
| SOTTOCAMPO 2-1 | 9 | 1800 kW | 1935 kVA | 2000 kVA |

| | | | | |
|----------------|---|---------|----------|----------|
| SOTTOCAMPO 2-2 | 9 | 1800 kW | 1935 kVA | 2000 kVA |
| SOTTOCAMPO 2-3 | 9 | 1800 kW | 1935 kVA | 2000 kVA |
| SOTTOCAMPO 2-4 | 9 | 1800 kW | 1935 kVA | 2000 kVA |
| SOTTOCAMPO 2-5 | 9 | 1800 kW | 1935 kVA | 2000 kVA |

Alla cabina di campo 3 sono sottese 6 cabine di sottocampo secondo il seguente schema:

| CAMPO FOTOVOLTAICO 3 | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------|----------------------------|----|--------------------------------|-----|----------------------|-----|
| SOTTOCAMPI FOTOVOLTAICI | N. INVERTER /CABINA | POTENZA NOMINALE AC/CABINA | | POTENZA MAX AC CABINA (cosφ=1) | | POTENZA RTRAFO MT/BT | |
| SOTTOCAMPO 3-1 | 9 | 1800 | kW | 1935 | kVA | 2000 | kVA |
| SOTTOCAMPO 3-2 | 9 | 1800 | kW | 1935 | kVA | 2000 | kVA |
| SOTTOCAMPO 3-3 | 9 | 1800 | kW | 1935 | kVA | 2000 | kVA |
| SOTTOCAMPO 3-4 | 9 | 1800 | kW | 1935 | kVA | 2000 | kVA |
| SOTTOCAMPO 3-5 | 9 | 1800 | kW | 1935 | kVA | 2000 | kVA |

Dai moduli fotovoltaici alle cabine inverter di ciascun sottocampo sono distribuite le linee DC in cavo interrato che collegano i moduli direttamente allo stadio di ingresso DC degli inverter.

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Nel presente progetto, che come già detto si riferisce alla porzione di impianto che va dal campo fotovoltaico fino alla SSEU, si è fatto riferimento, tra l'altro, alla seguente normativa:

- Regio Decreto 11 dicembre 1933, n. 1775 "Testo unico delle disposizioni di legge sulle acque e impianti elettrici;
- Legge 23 luglio 2009, n°99 , "Disposizioni per lo sviluppo e l'internazionalizzazione delle imprese, nonché in materia di energia";
- Decreto del 27/02/09 , Ministero della Sviluppo Economico;
- Decreto del 29/05/08, "Approvazione delle procedure di misura e valutazione dell'induzione magnetica";
- DM del 29.5.2008, "Approvazione della metodologia di calcolo delle fasce di rispetto per gli elettrodotti";
- Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 08/07/2003, "Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti", G.U. 28 agosto 2003, n. 200;
- Legge quadro 22/02/2001, n. 36, "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici", G.U. 7 marzo 2001, n.55;
- Norma 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";
- Norma CEI 211-4 "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche";
- Norma 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".
- Norma CEI 11-17: Impianti di produzione, trasmissione e distribuzione di energia elettrica – Linee in cavo.

3. FONTI DI EMISSIONE

Le apparecchiature elettromeccaniche e le linee elettriche previste nella realizzazione del parco agrovoltaico in oggetto generano normalmente, durante il loro funzionamento, campi elettromagnetici con radiazioni non ionizzanti.

In particolare, sono da considerarsi come sorgenti di campo elettromagnetico le seguenti componenti del parco:

1) Linee elettriche a servizio del parco:

- a) elettrodotto 36 kV di interconnessione fra le cabine di sottocampo e le cabine di campo;
- b) elettrodotto 36 kV di vettoriamento dell'energia prodotta dalla Centrale agrovoltaiica verso la nuova SE di Terna S.p.A.;

2) le cabine di sottocampo contenenti trasformatori 36/0,4 kV, quadri a 36 kV, quadri BT 0,4 kV;

3) le cabine di sottocampo contenenti trasformatori 36/0,8 kV, quadri a 36 kV, quadri BT 0,8 kV.

Per quanto riguarda le linee interrate di collegamento in corrente continua tra i moduli fotovoltaici e gli inverter dove avviene la conversione e trasformazione si consideri che:

- tale sezione di impianto è tutta esercita in **corrente continua (0 Hz)**;
- la buona esecuzione vuole che i cavi di diversa polarizzazione (+ e -) viaggino sempre a contatto, annullando quasi del tutto i campi magnetici **statici** prodotti in un punto esterno;
- la **raccomandazione 1999/519/CE** (una raccomandazione del Consiglio Europeo che stabilisce limiti da rispettare in caso di esposizione della popolazione) per i campi magnetici statici (frequenza 0 - 1 Hz) stabilisce un limite di riferimento per l'induzione magnetica che non deve essere superato pari di 40 mT (40.000 μ T), valore enormemente più alto dell'equivalente per la corrente a 50 Hz (valore di attenzione 3 μ T obbligatorio per tutte le nuove installazioni).

Per quanto sopra detto, si può certamente escludere il superamento dei limiti di riferimento dei valori di campo magnetico statico dovuto alla sezione in corrente continua.

Le rimanenti componenti dell'impianto (impianto di illuminazione BT, impianto TVCC e apparecchiature del sistema di controllo) sono state giudicate non significative dal punto di vista delle emissioni elettromagnetiche e, pertanto, non verranno trattate ai fini della valutazione.

Di seguito verrà data una caratterizzazione delle sorgenti appena individuate.

3.1 Elettrodotto 36 kV

Tutti i cavi di cui si farà utilizzo, sia per il collegamento interno dei sottocampi che per la connessione alla SSEU, saranno del tipo standard. Si tratta di cavi multipolari riuniti in elica visibile, con conduttori in alluminio, congiunti in maniera da formare un unico fascio di forma rotonda.

Per l'attraversamento dei corsi d'acqua (vedi PD-Tav11) è prevista la posa interrata mediante TRIVELLAZIONE ORIZZONTALE CONTROLLATA (T.O.C.).

Nel caso in questione, per i seguenti attraversamenti vedi (vedi PD-Tav11):

1. ELEMENTO IDRICO STRAHLER ORDINE 1 – FIUME 4501
2. ELEMENTO IDRICO STRAHLER ORDINE 1 – FIUME 10087
3. CANALE RIPARTITORE N. O. EAF (RIPARTITORE BASSO NO)

è prevista l'utilizzazione della T.O.C. per posare un tubo di polietilene PN 16 che attraverserà in sub-alveo il fiume stesso. Il cavidotto conterrà tutti i cavi di energia, il cavo in fibra ottica e il conduttore di terra. I tubi che vengono abitualmente posati, compatibilmente alla tecnologia intrinseca della T.O.C., sono classificati PEAD UNI 7611-76 tipo 312.

Per il dettaglio dei tipologici di posa, si rimanda all'elaborato PD-Tav07.

La tensione di esercizio dei cavi è pari a 36kV. Le correnti nominali per ciascuna linea sono funzione della potenza vettoriata (vedi Schema elettrico unifilare DC rif. PD-Tav02, Schema elettrico unifilare AC rif. PD-Tav03 con allegati calcoli elettrici). La tabella che segue riporta le tipologie e le formazioni dei cavi MT utilizzati nelle diverse sezioni di impianto.

| Partenza linea | Arrivo Linea | Tipo di cavo | Formazione | Campo Fotovoltaico |
|---|--------------------------|-------------------------------|-------------|--------------------|
| QUADRO MEDIA TENSIONE SOTTOSTAZIONE AT/MT | CABINA DI CAMPO 1 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x240) mmq | Campo 1 |
| CABINA DI CAMPO 1 | CABINA DI SOTTOCAMPO 1-1 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x50) mmq | Campo 1 |
| CABINA DI CAMPO 1 | CABINA DI SOTTOCAMPO 1-2 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x50) mmq | Campo 1 |
| CABINA DI CAMPO 1 | CABINA DI SOTTOCAMPO 1-3 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x50) mmq | Campo 1 |
| CABINA DI CAMPO 1 | CABINA DI SOTTOCAMPO 1-4 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x50) mmq | Campo 1 |
| CABINA DI CAMPO 1 | CABINA DI SOTTOCAMPO 1-5 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x50) mmq | Campo 1 |
| Partenza linea | Arrivo Linea | Tipo di cavo | Formazione | Campo Fotovoltaico |
| QUADRO MEDIA TENSIONE SOTTOSTAZIONE AT/MT | CABINA DI CAMPO 2 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x240) mmq | Campo 2 |
| CABINA DI CAMPO 2 | CABINA DI SOTTOCAMPO 2-1 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x50) mmq | Campo 2 |
| CABINA DI CAMPO 2 | CABINA DI SOTTOCAMPO 2-2 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x50) mmq | Campo 2 |
| CABINA DI CAMPO 2 | CABINA DI SOTTOCAMPO 2-3 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x50) mmq | Campo 2 |
| CABINA DI CAMPO 2 | CABINA DI SOTTOCAMPO 2-4 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x50) mmq | Campo 2 |
| CABINA DI CAMPO 2 | CABINA DI SOTTOCAMPO 2-5 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x50) mmq | Campo 2 |
| Partenza linea | Arrivo Linea | Tipo di cavo | Formazione | Campo Fotovoltaico |
| QUADRO MEDIA TENSIONE SOTTOSTAZIONE AT/MT | CABINA DI CAMPO 3 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x240) mmq | Campo 3 |
| CABINA DI CAMPO 3 | CABINA DI SOTTOCAMPO 3-1 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x50) mmq | Campo 3 |
| CABINA DI CAMPO 3 | CABINA DI SOTTOCAMPO 3-2 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x50) mmq | Campo 3 |

| | | | | |
|-------------------|--------------------------|-------------------------------|------------|---------|
| CABINA DI CAMPO 3 | CABINA DI SOTTOCAMPO 3-3 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x50) mmq | Campo 3 |
| CABINA DI CAMPO 3 | CABINA DI SOTTOCAMPO 3-4 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x50) mmq | Campo 3 |
| CABINA DI CAMPO 3 | CABINA DI SOTTOCAMPO 3-5 | ARE4H5EX tripolare elicordato | (3x50) mmq | Campo 3 |

Tutte le linee in cavo soddisfano la verifica termica prevista dalla normativa vigente, sia per quanto concerne le correnti di cortocircuito che per la tenuta termica dei cavi (vedi PD-Tav03 con allegati calcoli elettrici).

3.2 Cabine di campo

Sono previste 5 cabine di campo contenenti:

- un quadro 36 kV;
- un trasformatore 36kV/400V da 100 kVA per servizi ausiliari;
- un quadro BT;

Ciascun componente interno alla cabina di campo fornirà, in misura differente, un contributo al campo elettromagnetico esterno alla stessa. Per la valutazione degli effetti elettromagnetici all'esterno di ciascuna cabina di campo, è stata valutata la sovrapposizione delle componenti derivanti da ciascuna apparecchiatura interna.

3.3 Cabine di sottocampo

Sono previste 15 cabine di sottocampo contenenti:

- un quadro 36 kV;
- un trasformatore 36kV/800V da 2000 kVA
- un quadro BT;

Ciascun componente interno alla cabina di sottocampo fornirà, in misura differente, un contributo al campo elettromagnetico esterno alla stessa. Per la valutazione degli effetti elettromagnetici all'esterno di ciascuna cabina di sottocampo, è stata valutata la sovrapposizione delle componenti derivanti da ciascuna apparecchiatura interna.

4. VALORI LIMITE DI RIFERIMENTO

Nella redazione della relazione tecnica sui campi elettromagnetici è stato tenuto conto della normativa vigente in materia. In particolare, sono state recepite le indicazioni contenute nel DPCM 08/07/2003, il quale fissa i limiti di esposizione, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete generati dagli elettrodotti. Si è, inoltre, tenuto conto di quanto previsto dal DM 29/05/2008 per la

determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti (metodologia di calcolo indicata dall'APAT), e della Legge quadro 22/02/2001, n. 36, "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici", G.U. 7 marzo 2001, n.55.

4.1 Valori limite del campo magnetico

Per quanto concerne il campo magnetico generato dagli elettrodotti, esistono tre diverse soglie cui fare riferimento, fissate attraverso il DPCM 8/07/2003. L'art. 3 del citato decreto indica come soglie i valori dell'induzione magnetica mostrati in tabella.

| Soglia | Valore limite del campo magnetico |
|--|---|
| Limite di esposizione | 100 μT (da intendersi come valore efficace) |
| Valore di attenzione (misura di cautela per la protezione da possibili effetti a lungo termine, nelle aree di gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere) | 10 μT intendersi come mediana dei valori 4 ore nelle normali condizioni |
| Obiettivo di qualità (nella progettazione di nuovi elettrodotti in aree di gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere, e nella progettazione di nuovi insediamenti e delle nuove aree di cui sopra in prossimità delle linee ed installazioni elettriche già presenti nel territorio) | 3 μT (da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio) |

4.2 Valori limite del campo elettrico

Per quanto concerne il campo elettrico, il DPCM 8/07/2003 stabilisce il valore limite di tale campo pari a 5kV/m, inteso come valore efficace.

5. CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DAGLI ELETTRODOTTI 36 kV

Quella che viene presentata in questi paragrafi è una valutazione analitica del campo magnetico generato dagli elettrodotti a 36 kV, basata sulle metodologie di calcolo suggerite dall'APAT (Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici), approvate dal D.M. 29/05/2008, e specificate dalla norma CEI 106-11.

Per la valutazione del campo magnetico generato dagli elettrodotti a 36 kV occorre innanzitutto distinguere gli elettrodotti in funzione della tipologia dei cavi utilizzati.

Il progetto, infatti, prevede l'utilizzo di cavi del tipo in alluminio schermati in posa a trifoglio a elica visibile.

La tabella che segue mostra le differenti tipologie di cavi da utilizzare e le caratteristiche di posa:

| | | |
|----------------------------|--|--|
| Tipo di cavo | ARE4H5EX tripolare cordato ad elica visibile | ARE4H5EX tripolare cordato ad elica visibile |
| Sezione (mm ²) | 3x50 | 3x240 |
| Tipo posa | Interrata | Interrata |
| Profondità posa (m) | 1,10 | 1,10 |

I cavi in progetto presentano tutti una configurazione ad elica visibile. Dalla normativa citata, le particolarità costruttive di questi cavi, ossia la ridotta distanza tra le fasi e la loro continua trasposizione dovuta alla cordatura, fanno sì che il campo magnetico prodotto sia notevolmente inferiore a quello prodotto da cavi analoghi posati in piano o a trifoglio. In aggiunta a questa prima considerazione, si fa notare come la metodologie di calcolo suggerite dall'APAT (Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici), approvate dal D.M. 29/05/2008, con le quali verranno condotti i calcoli nel seguito, fanno esplicito riferimento al caso in questione come un caso per il quale non è richiesto alcun calcolo delle fasce di rispetto.

All'art. 3.2 dell'allegato al suddetto decreto viene infatti detto che:

"sono escluse dall'applicazione della metodologia:

-
- *Le linee in MT in cavo cordato ad elica (interrate o aeree);*
-

In tutti questi casi le fasce associabili hanno ampiezza ridotta, inferiori alle distanza previste dal Decreto interministeriale n. 449/88 e dal decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 16 gennaio 1991".

Trattandosi nei casi in questione di un elettrodotto costituito da linee in interrate in cavo cordato ad elica, come evidenziato in precedenza, non è necessario alcuno studio circa i campi magnetici generati dai cavi di sezione 50 – 240 mm².

E' sufficiente quindi una semplice analisi qualitativa per affermare che, per tutti gli elettrodotti presenti in impianto, dalla SSEU fino alle cabine di campo e di sottocampo, è inferiore ai valori limite richiesti dalla normativa e dalle leggi vigenti.

6. CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DALLE CABINE DI CAMPO

L'analisi del campo magnetico generato dalle cabine di campo è stata condotta utilizzando il software specifico che utilizza le metodologie di calcolo della Norma 211-4. In appendice (par 9.3) alla presente relazione è allegato un "Documento di Validazione" fornito dal produttore del software stesso ("Beshielding").

I valori dell'induzione magnetica all'esterno di ciascuna cabina di campo sono stati ricavati inserendo, all'interno della cabina, tutti i componenti in grado di generale campi magnetici apprezzabili. Il risultato ottenuto è rappresentato nei grafici allegati alla presente e mostra che, all'esterno di ciascuna cabina di campo, la distanza oltre la quale il valore dell'induzione magnetica $B < 3 \mu T$ è sempre inferiore a **2 metri** sia in orizzontale sia in verticale. Si assume pertanto, per tutte le cabine di campo, una **DPA=2 m sia in orizzontale sia in verticale a partire dalle pareti della cabina di campo stessa.**

In appendice al presente documento (par. 9.1) sono rappresentate le curve isolivello dell'induzione magnetica nell'intorno della cabina di campo tipo.

7. CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DALLE CABINE DI SOTTOCAMPO

L'analisi del sottocampo magnetico generato dalle cabine di sottocampo è stata condotta utilizzando il software specifico che utilizza le metodologie di calcolo della Norma 211-4. In appendice (par 9.3) alla presente relazione è allegato un "Documento di Validazione" fornito dal produttore del software stesso ("Beshielding").

I valori dell'induzione magnetica all'esterno di ciascuna cabina di sottocampo sono stati ricavati inserendo, all'interno della cabina, tutti i componenti in grado di generale campi magnetici apprezzabili. Il risultato ottenuto è rappresentato nei grafici allegati alla presente e mostra che, all'esterno di ciascuna cabina di sottocampo, la distanza oltre la quale il valore dell'induzione magnetica $B < 3 \mu T$ è sempre inferiore a **4 metri** sia in orizzontale sia in verticale. Si assume pertanto, per tutte le cabine di sottocampo, una **DPA=4 m sia in orizzontale sia in verticale a partire dalle pareti della cabina di sottocampo stessa.**

In appendice al presente documento (par. 9.1) sono rappresentate le curve isolivello dell'induzione magnetica nell'intorno della cabina di sottocampo tipo.

8. CONCLUSIONI.

Nella presente relazione è stato condotto uno studio analitico volto a valutare l'impatto elettromagnetico delle opere da realizzare, e, sulla base delle risultanze, individuare eventuali fasce di rispetto da apporre al fine di garantire il raggiungimento degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici, secondo il vigente quadro normativo. Una volta individuate le possibili sorgenti dei campi elettromagnetici, per ciascuna di esse è stata condotta una valutazione, volta a determinare la consistenza dei campi generati dalle sorgenti e l'eventuale distanza di prima approssimazione (DPA).

Di seguito i principali risultati:

8.1 – Elettrodotti 36 kV

Sono presenti solo cavi tripolari ad elica visibile (sezioni 50-240 mm²) i cui campi elettromagnetici sono trascurabili. Per essi non è necessaria l'apposizione di alcuna fascia di rispetto.

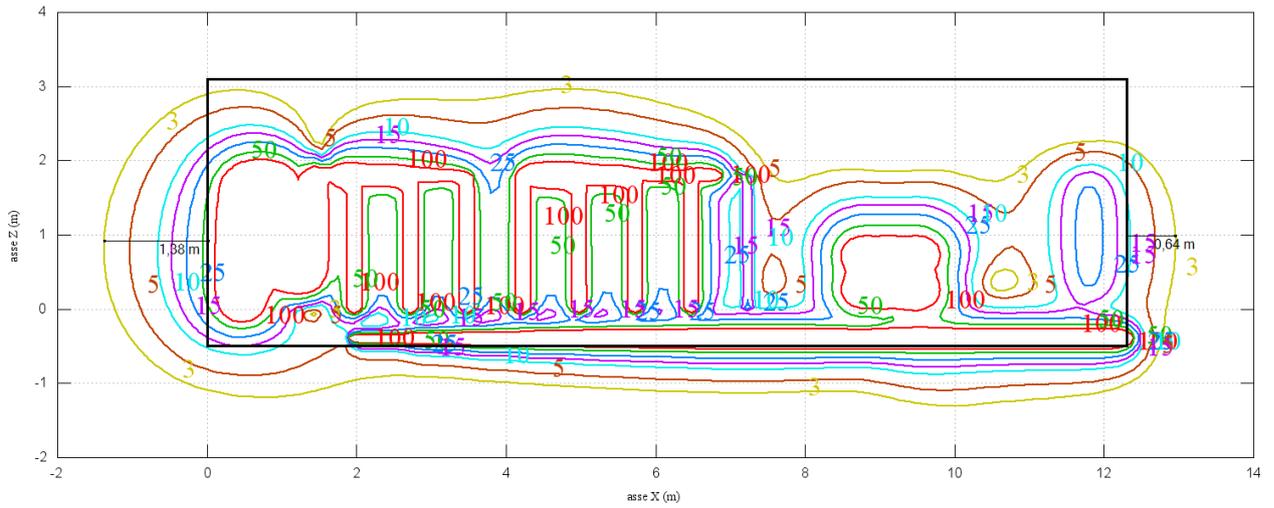
8.2 – Cabine di campo

Per il suddetto componente è stata ricavata, mediante l'utilizzo di software specifico ("Beshielding", in allegato i risultati della simulazione) una **DPA di 2 m** sia in orizzontale sia in verticale a partire dalle pareti della cabina di campo stessa. In ogni caso le aree di rispetto individuate (aree con $B > 3 \mu\text{T}$), sono confinate all'interno della recinzione che delimita l'impianto. Per la rappresentazione grafica, fare riferimento alla tavola PD-Tav06.

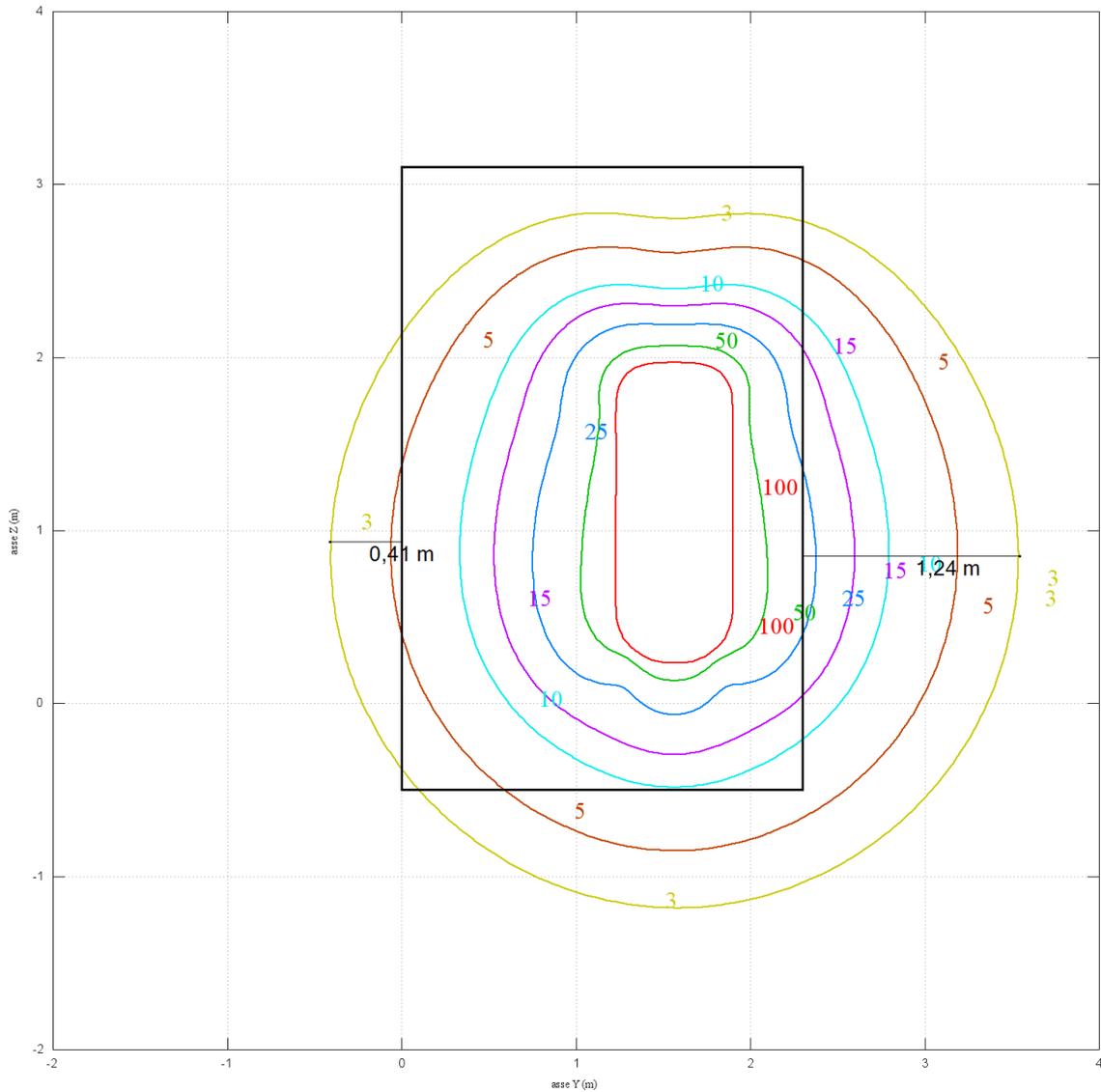
8.1 – Cabine di sottocampo

Per il suddetto componente è stata ricavata, mediante l'utilizzo di software specifico ("Beshielding", in allegato i risultati della simulazione) una **DPA di 4 m** sia in orizzontale sia in verticale a partire dalle pareti della cabina di sottocampo stessa. In ogni caso le aree di rispetto individuate (aree con $B > 3 \mu\text{T}$), sono confinate all'interno della recinzione che delimita l'impianto. Per la rappresentazione grafica, fare riferimento alla tavola PD-Tav06.

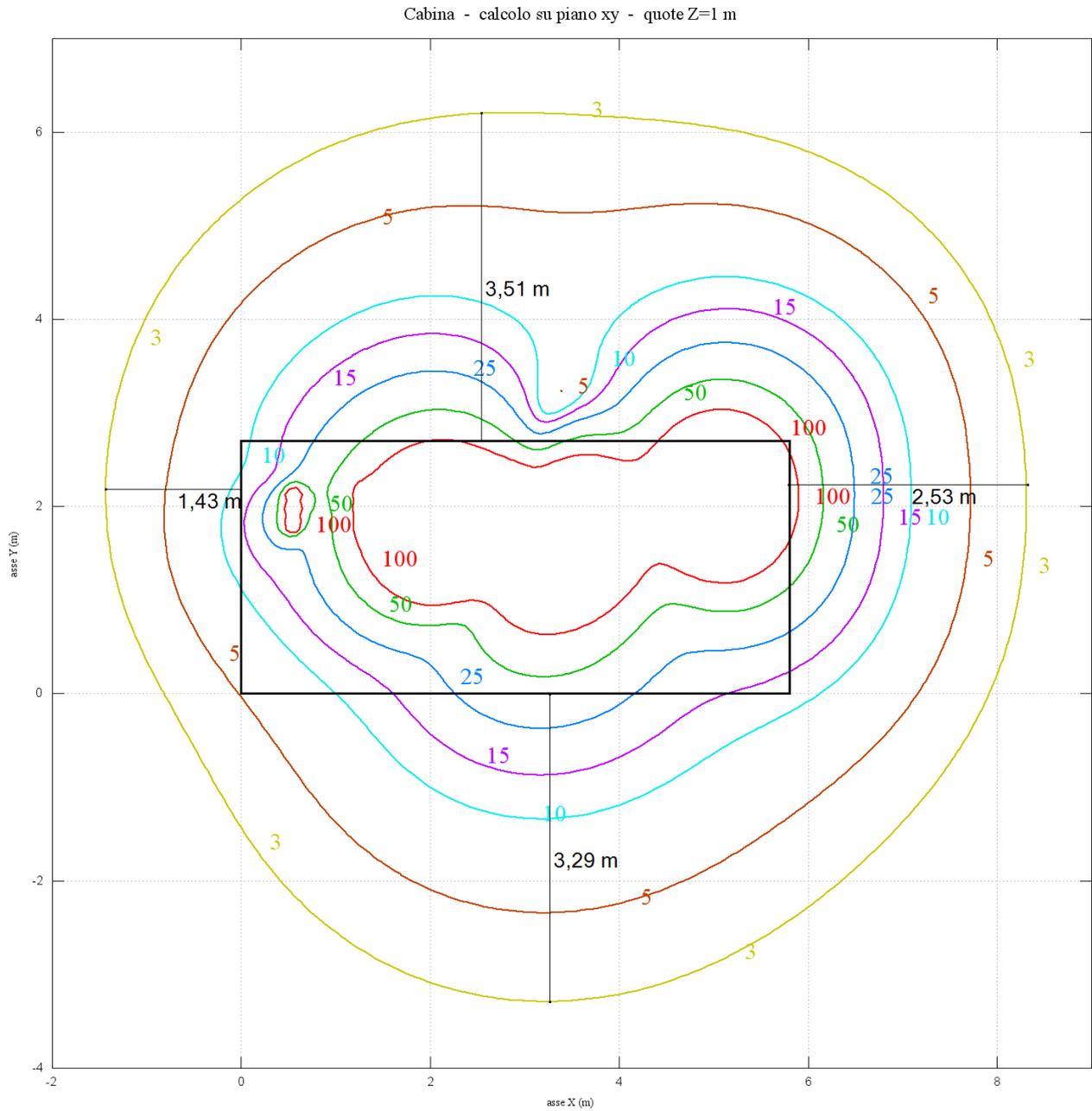
Cabina - calcolo su piano xz - quote Y=1,55 m



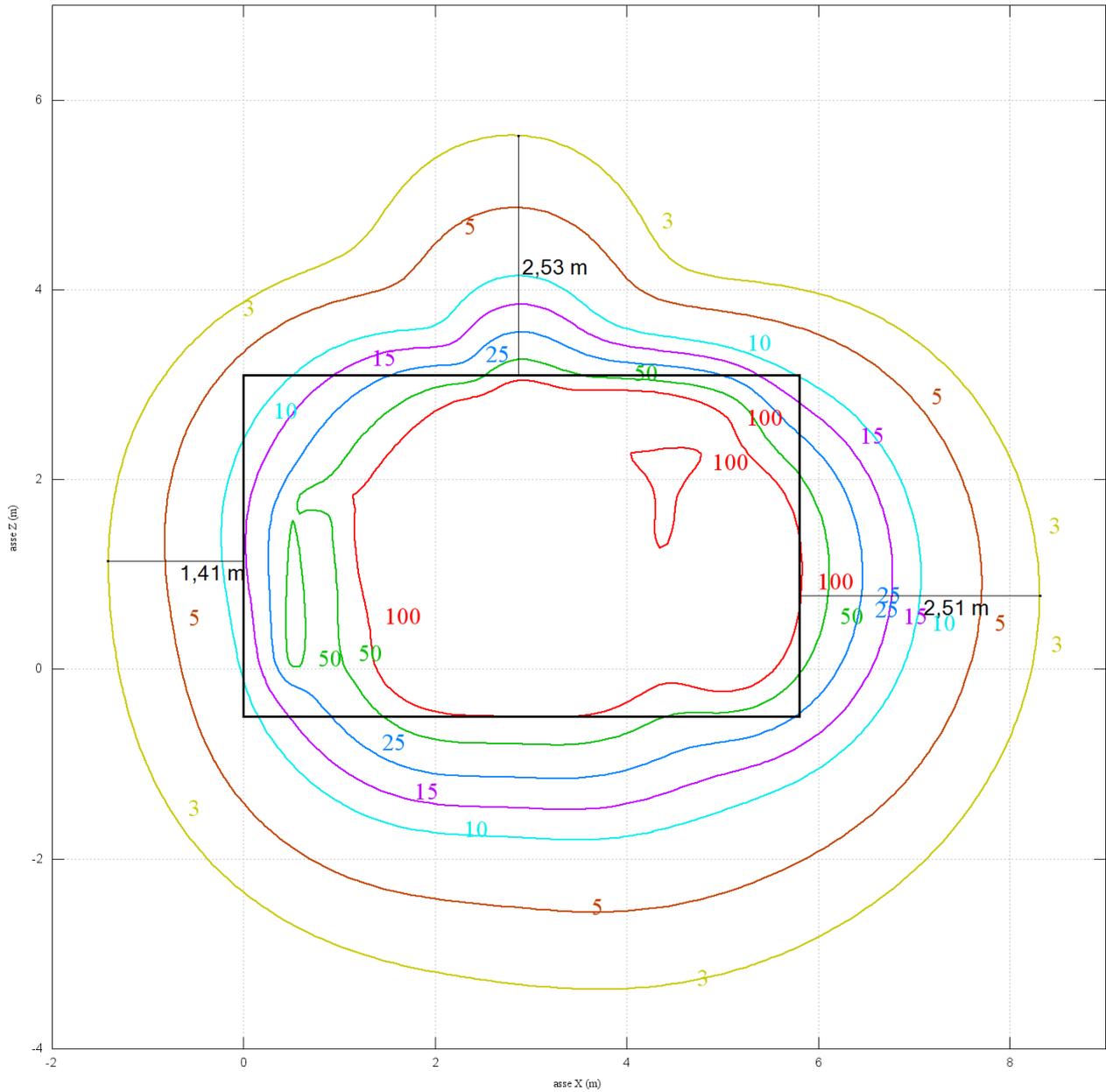
Cabina - calcolo su piano yz - quote X=1 m



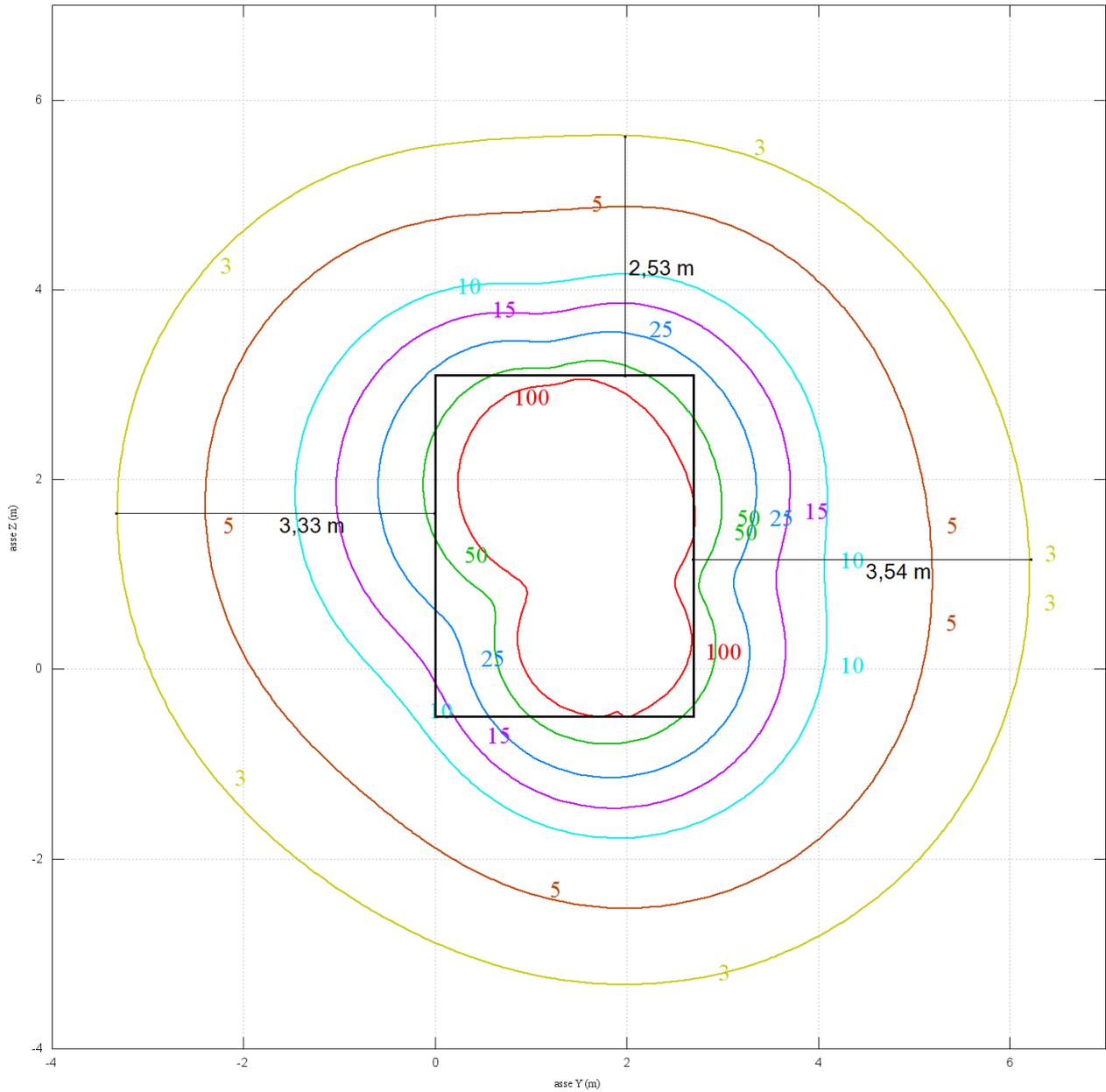
9.2 Curve isolivello induzione magnetica nell'intorno della cabina di sottocampo tipo.



Cabina - calcolo su piano xz - quote Y=1,7 m



Cabina - calcolo su piano yz - quote X=2,8 m



9.3 Documento di validazione software di calcolo.



Documento di Validazione

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

Data:09/01/2020

Rev.02

BEShielding S.r.l. - Via Ferrero, 10 - 10098 Rivoli (TO) Italy - Tel. +39 011 95 90 111 - Fax +39 011 95 90 230 - shielding@beshielding.com - lusbar@beshielding.com - www.beshielding.com
Codice Fiscale e P.IVA IT10105760010 - Codice Destinatario: SRUOR2D - Capitale Sociale € 100.000,00 i.v. - Registro delle Imprese di Torino - R.E.A. n° TO 1105901 - Foro Competente Torino
BEShielding S.r.l. a socio unico - società soggetta a direzione e coordinamento di Sati Italia S.p.A.





Sommario

| | |
|---|----|
| Premessa | 3 |
| 1 Verifica del modulo bidimensionale | 3 |
| 1.1 Confronto con CEI 211-04..... | 3 |
| 1.2 Confronto con codice CESI | 4 |
| 2 Verifica del modulo tridimensionale | 8 |
| 2.1 Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato | 8 |
| 2.2 Validazione sperimentale del modulo tridimensionale..... | 9 |
| 3 Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza | 10 |
| 3.1 Verifica del modello MAGIC della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method) | 10 |
| 3.2 Verifica del modello MAGIC del trasformatore completo con misure sperimentali..... | 13 |
| Conclusioni | 14 |



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).

1 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.

1.1 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 \mathbf{B} è data dall'espressione:

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

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

In particolare è stato analizzato il caso, che verrà riportato successivamente, relativo ad una linea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di



BESHIELDING

310 A. Come si può osservare dalla figura 1, le due curve sono praticamente coincidenti.

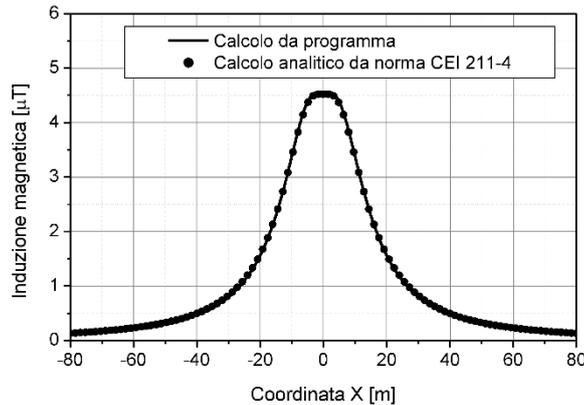


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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.

1.2 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

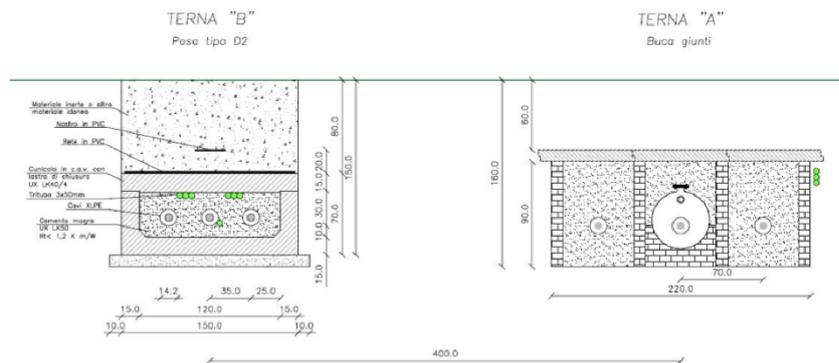


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT



BESHIELDING

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.

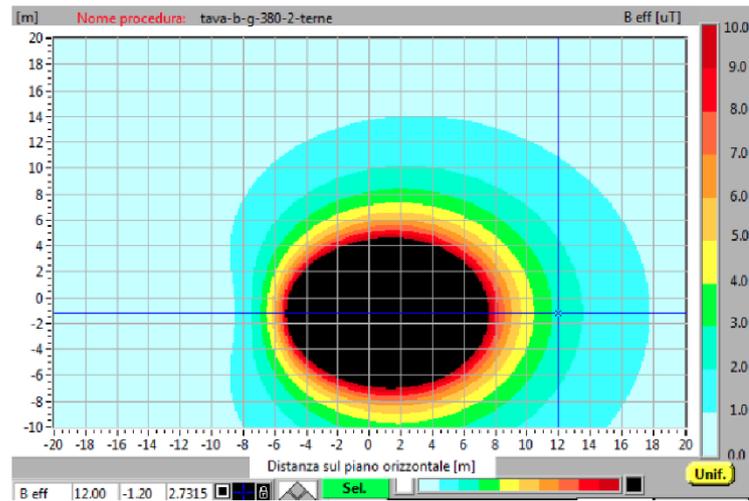


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.



BESHIELDING

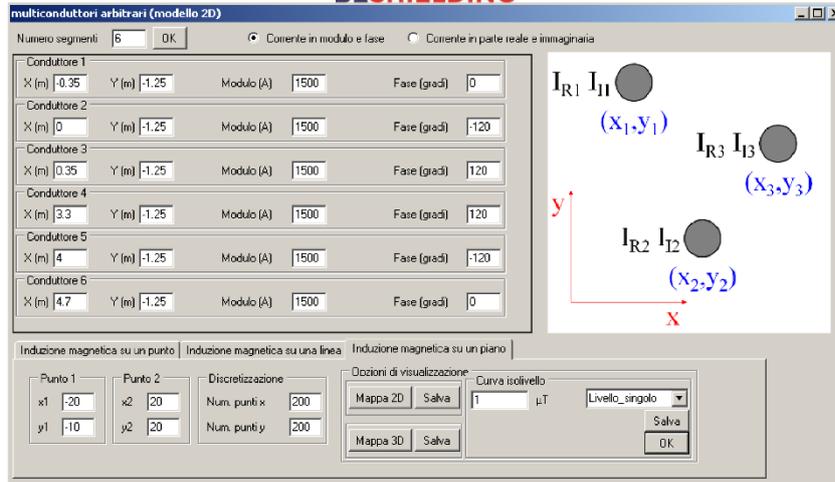


Figura 4:Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)”: dati definizione geometria e sorgenti

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

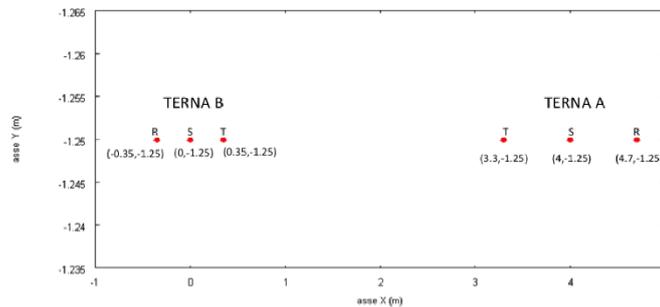


Figura 5: Geometria sorgenti

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

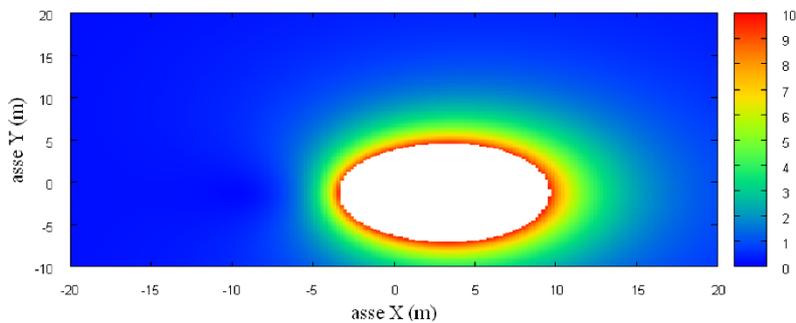


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

**BESHIELDING**

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

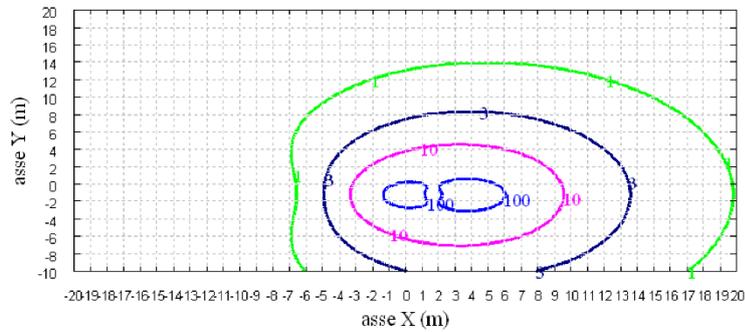


Fig. 7 Linee isolivello dell'induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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



2 Verifica del modulo tridimensionale

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

| | |
|---|--|
| $\vec{h} = \int \frac{i d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^3}$ | |
|---|--|

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.

2.1 Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato

Si consideri il segmento rappresentato nella Fig. 8.

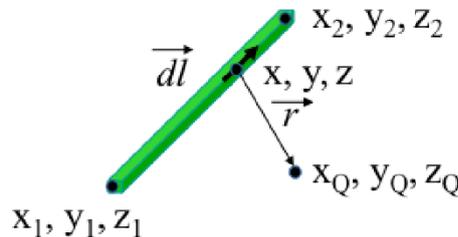


Fig. 8: Modello del segmento.

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

$$x = x_1 + (x_2 - x_1)t$$

$$y = y_1 + (y_2 - y_1)t$$

$$z = z_1 + (z_2 - z_1)t$$

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



BESIELDING

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

2.2 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.

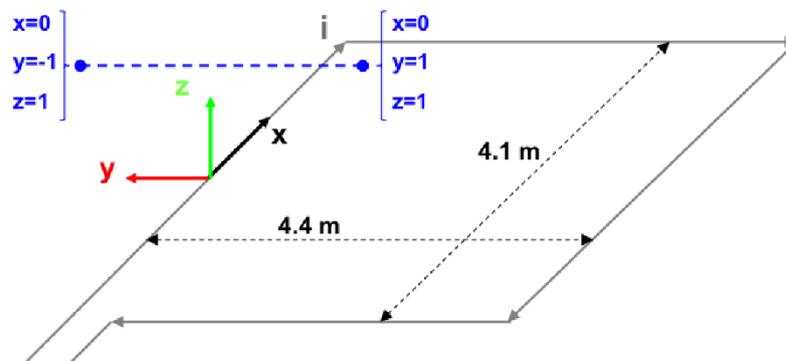


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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

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

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.

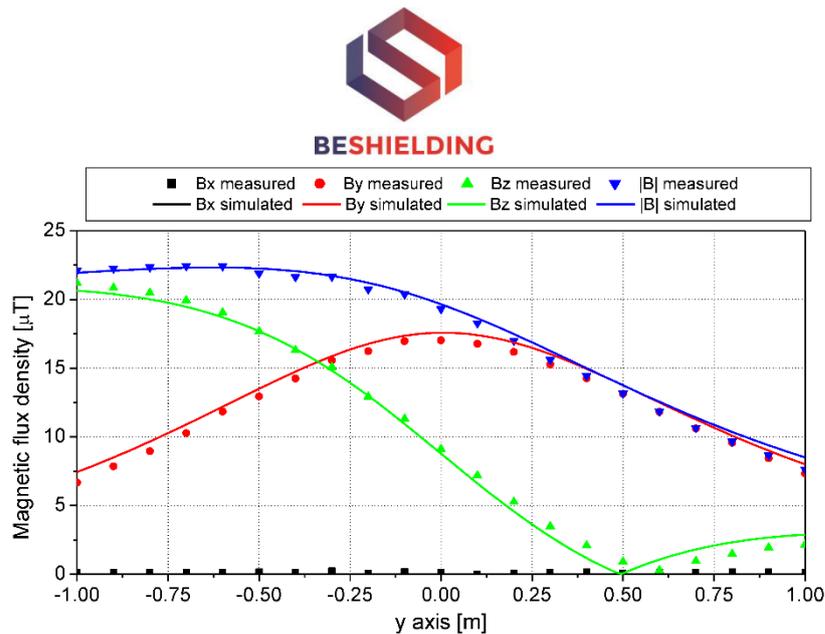


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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

3 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.

3.1 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



BESHIELDING

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.

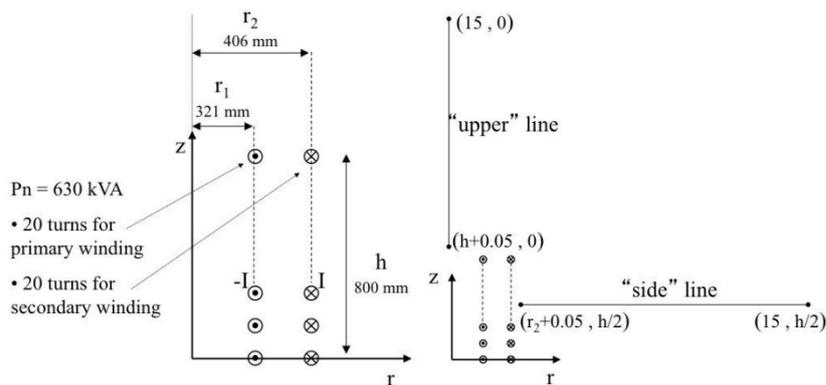


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

Le Fig. 12 e 13 mostrano, rispettivamente, i valori di induzione magnetica lungo la linea ad 1 m 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 e 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:

$$I = I_R \cdot \frac{V_{SC} \%}{100} \quad (14)$$

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



BESHIELDING

secondario (I_{R1} o I_{R2}) e corrispondentemente occorre considerare le spire di primario o secondario (N_1 e N_2).

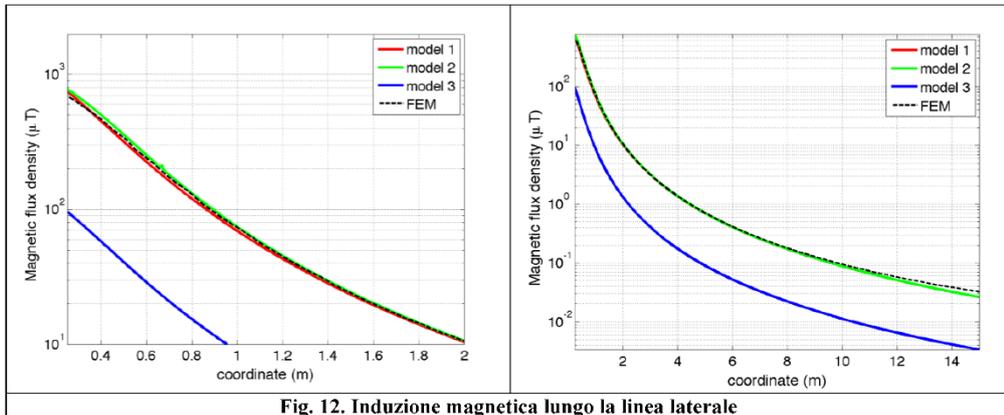


Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale

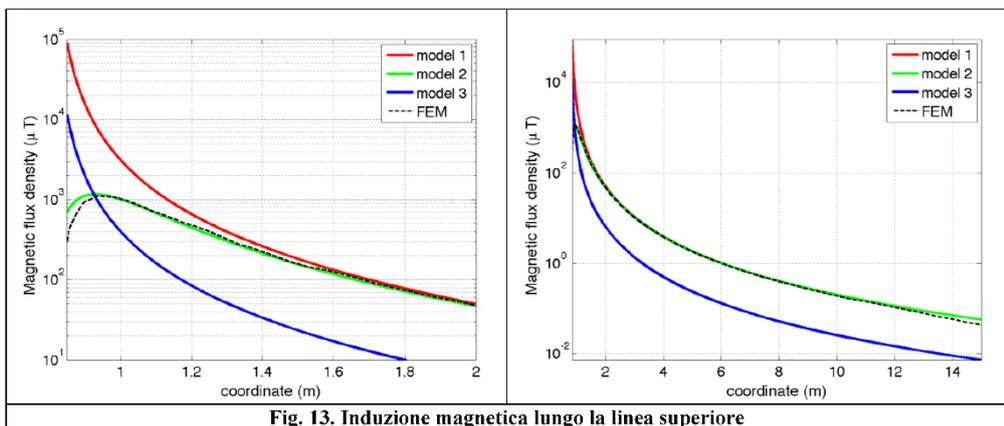


Fig. 13. Induzione magnetica lungo la linea superiore

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.



3.2 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 il campo magnetico ambientale, specialmente nella direzione S1. Pertanto, l'introduzione di tali sorgenti aggiuntive agli avvolgimenti porta ad una riduzione degli scostamenti tra i vari modelli.

In Fig. 16 e 17 sono riportati i confronti tra le induzioni magnetiche, lungo le linee S1 ed S2, misurate e calcolate con i diversi modelli.

Come si può osservare, in particolare per la linea S2 (dove il contributo delle connessioni è trascurabile) il modello 1 ed il modello 2 approssimano in modo soddisfacente i dati sperimentali.

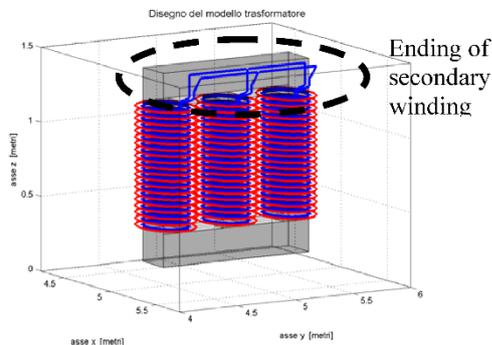


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate al lati BT.

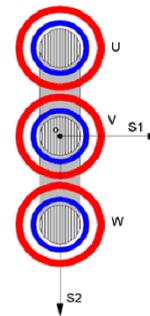


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2



BESHIELDING

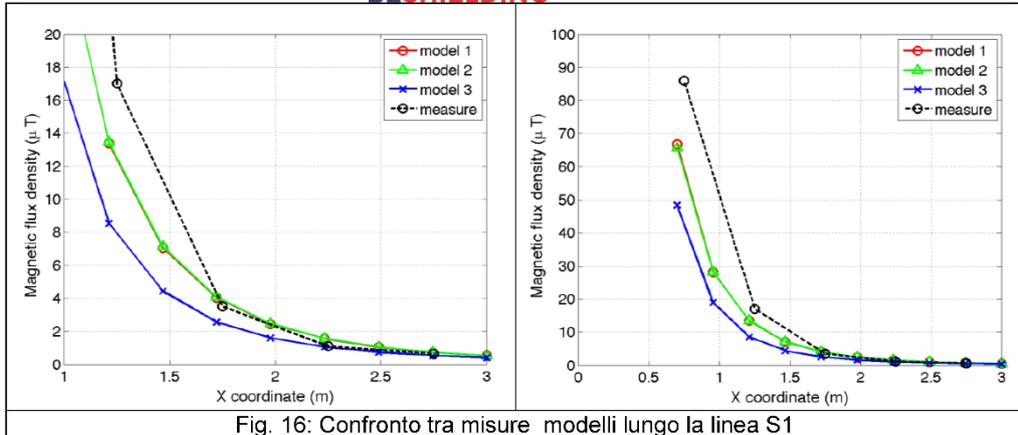


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

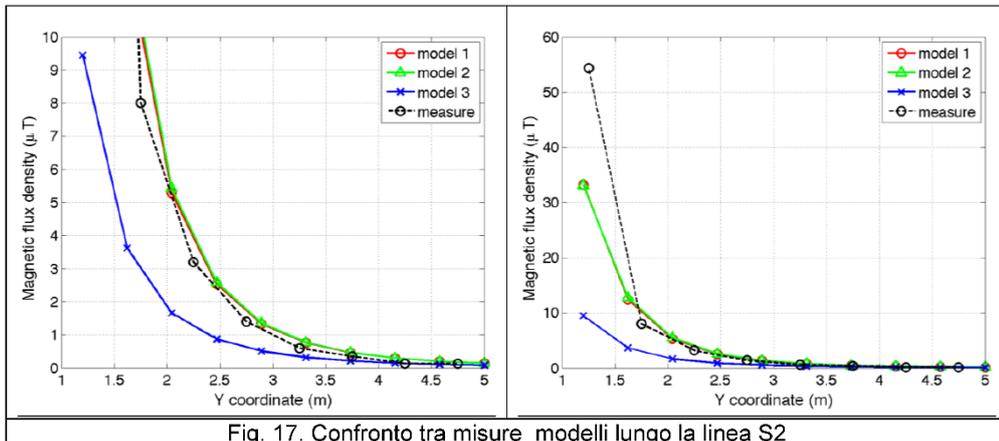


Fig. 17: Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

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 esplicitiva e

**BESHIELDING**

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.