

PROPONENTE:

D&D Costruzioni s.r.l.

Sede in:

Viale Aleardo Aleardi, 1/D - 50124 Firenze, Italia

Pec: costruzionided@pec.it



PROVINCIA DI
NUORO



PROVINCIA
DEL SUD
SARDEGNA



COMUNE DI
USSASSAI



COMUNE DI
SEUI



COMUNE DI
ESCALAPLANO



COMUNE DI
ESTERZILI



REGIONE
AUTONOMA DELLA
SARDEGNA

OGGETTO:

PROGETTO DEFINITIVO DI UN IMPIANTO EOLICO COMPOSTO DA 6 AEROGENERATORI CON POTENZA COMPLESSIVA DI 36 MW, DENOMINATO "SU CASTEDDU", NEL COMUNE DI USSASSAI (NU) E OPERE CONNESSE NEI COMUNI DI USSASSAI, SEUI (SU), ESTERZILI (SU) E ESCALAPLANO (SU)

NOME ELABORATO:

RELAZIONE TECNICA COMPATIBILITÀ ELETTROMAGNETICA IMPIANTO E LINEA DI CONNESSIONE

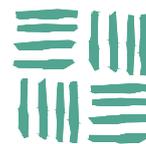
PROGETTO SVILUPPATO DA:

AGREENPOWER s.r.l.

Sede legale: Via Serra, 44

09038 Serramanna (SU) - ITALIA

Email: info@agreenpower.it



agreenpower s.r.l.

GRUPPO DI LAVORO:

Ing. Simone Abis
Dott. Ing. Fabio Sirigu
Dott. Ing. Daniele Cabiddu
Arch. Roberta Sanna
Ing. Danilo Marras
Dott. Gianluca Fadda

COLLABORATORI:

Vamirgeoind Ambiente Geologia e
Geofisica Srl
bmp Srl
Dott. Archeologo Matteo Tatti
Dott. Geologo Luigi Sanciu
Dott. Naturalista Francesco Mascia
Dott. Agronomo Vincenzo Sechi
Ing. Federico Miscali
Ing. Vincenzo Carboni

TIMBRO E FIRMA:

SCALA:	CODICE ELABORATO	TIPOLOGIA	FASE PROGETTUALE			
-	REL.PE.03	IMPIANTO EOLICO	DEFINITIVO			
FORMATO:						
-						
3						
2						
1						
0	Prima emissione	Marzo 2024	Agreenpower	Agreenpower	Agreenpower	
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO	



D&D COSTRUZIONI S.R.L.
IMPIANTO EOLICO "SU CASTEDDU"
POTENZA NOMINALE 36 MW

Comune di Ussassai (NU)
Comune di Seui (SU)
Comune di Esterzili (SU)
Comune di Escalaplano (SU)

REL.PE.03
RELAZIONE TECNICA COMPATIBILITÀ ELETTROMAGNETICA
IMPIANTO E LINEA DI CONNESSIONE

INDICE DELLE REVISIONI

Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
Marzo 2024	Prima emissione	Agreenpower	Agreenpower	Agreenpower

GRUPPO DI LAVORO

Nome e cognome	Ruolo
Dott. Gianluca Fadda	Coordinamento generale, amministrazione
Ing. Simone Abis	Progettazione civile, cartografia, vincolistica
Dott. Ing. Daniele Cabiddu	Progettazione ambientale, vincolistica
Dott. Ing. Fabio Sirigu	Progettazione elettrica
Arch. Roberta Sanna	Progettazione civile, cartografia
Ing. Danilo Marras	Progettazione civile, cartografia

SOMMARIO

1. Premessa.....	4
1.1. Descrizione del progetto	4
1.2. Tipo e ubicazione dell'impianto	4
1.3. Caratteristiche generali	4
2. Normativa di riferimento	6
3. Fonti di emissione	7
3.1. Elettrodotto MT	7
3.2. Aerogeneratori.....	8
3.3. Cabina di raccolta di campo	9
3.4. Cabina di trasformazione MT/AT step-up.....	9
4. Valori limite di riferimento.....	10
4.1. Valori limite del campo magnetico	10
4.2. Valori limite del campo elettrico.....	10
4.3. Metodologia di calcolo	11
5. Campo magnetico	13
5.1. Elettrodotto MT	13
5.2. Aerogeneratori.....	15
5.3. Cabina di raccolta di campo	17
5.4. Cabina di trasformazione MT/AT step-up.....	19
6. Conclusioni.....	22
7. Indice delle figure.....	23
8. Appendice	24

1. PREMESSA

1.1. Descrizione del progetto

La presente relazione descrittiva riguarda la progettazione dell'impianto elettrico interno al parco eolico, fino alla Sottostazione Elettrica Utente di trasformazione MT/AT (step-up o SSEU). Il parco eolico è denominato "Su Casteddu" ed è costituito da n. 6 aerogeneratori del produttore VESTAS, serie EnVentus modello V162-6.0 MW, ciascuno di potenza pari a 6 MW, aventi altezza mozzo 166 m e diametro del rotore 162 m, per complessivi 36 MW.

L'impianto sarà del tipo grid-connected e l'energia elettrica prodotta sarà riversata completamente in rete, salvo gli autoconsumi di centrale.

Come da STMG di TERNA allegata al preventivo di connessione datato 12/09/2023 - codice pratica 202303317 - si prevede un collegamento in antenna a 150 kV con una nuova stazione elettrica (SE) di smistamento a 150 kV RTN da inserire in entra-esce alla linea RTN 150 kV "Goni - Ulassai" e da collegare, per il tramite di due nuovi elettrodotti RTN a 150 kV, con una nuova SE di trasformazione RTN a 380/150 kV da inserire in entra - esce alla linea RTN 380 kV "Ittiri - Selargius".

La stessa STMG informa che, al fine di razionalizzare l'utilizzo delle strutture di rete, sarà necessario condividere lo stallo in stazione con altri impianti di produzione; in alternativa sarà necessario prevedere ulteriori interventi di ampliamento da progettare.

Al fine di consentire ciò, l'area destinata alla SSEU includerà una parte predisposta per espansioni future e per l'installazione di ulteriori trasformatori AT/MT.

La SSEU sarà trattata nel documento di progetto REL.PE.02 - Relazione di impianto di connessione alla rete (AT).

Per l'alimentazione dei servizi ausiliari è prevista l'installazione di un trasformatore 30/0,4 kV, della potenza di 100 kVA.

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

1.2. Tipo e ubicazione dell'impianto

L'impianto eolico è situato in agro del Comune di Ussassai (NU).

Le linee elettriche MT a 30 kV interrate, che connettono il sito di produzione alla SSEU, sono dislocate nei territori comunali di Ussassai, Seui (SU), Esterzili (SU) ed Escalaplano (SU). La Sottostazione Elettrica Utente si trova nel comune di Escalaplano (SU) e Seui (SU).

1.3. Caratteristiche generali

L'impianto eolico in esame sarà connesso direttamente alla rete AT previa realizzazione di una sottostazione di trasformazione AT/MT ("step-up").

Si prevede l'installazione di n. **6** aerogeneratori con potenza nominale di **6 MW** ciascuno per una potenza nominale totale di **36 MW**.

Gli aerogeneratori sono suddivisi in 3 sottocampi (gruppi) secondo il seguente schema:

- Gruppo 01
 - Aerogeneratore WTG-200
- Gruppo 02
 - Aerogeneratore WTG-201
 - Aerogeneratore WTG-202
 - Aerogeneratore WTG-203
- Gruppo 03
 - Aerogeneratore WTG-204
 - Aerogeneratore WTG-205

Gli aerogeneratori sono collegati fra di loro in entra-esce mediante linee **MT a 30 kV in cavo ARG7H1RX-30 kV tripolare elicordato interrato**. Le linee in uscita dagli aerogeneratori WTG-200, WTG-201, WTG-204 confluiscono a una cabina di raccolta di campo, la quale a sua volta è collegata alla sottostazione MT/AT (step-up) tramite una **linea MT a 30 kV in cavo unipolare interrato con formazione a trifoglio tipo ARG7H1R 18/30 kV**.

Lo schema di collegamento degli aerogeneratori è riportato sul documento di progetto *ELB.PE.02 - Schema a blocchi opere elettriche*.

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Nel presente progetto si è fatto riferimento, tra l'altro, alla seguente normativa:

- Decreto del 29/05/08, "Approvazione delle procedure di misura e valutazione dell'induzione magnetica";
- DM del 29/05/08, "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;
- E-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;
- E-Distribuzione: Guida per le connessioni alla rete elettrica di ENEL distribuzione – Ed. 5. Marzo 2015.

3. FONTI DI EMISSIONE

Le apparecchiature elettromeccaniche previste nella realizzazione del parco eolico 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 MT di interconnessione fra gli aerogeneratori e la cabina di raccolta;
 - b) elettrodotto MT di vettoriamento dell'energia prodotta dal parco eolico verso la SSEU adiacente alla SE;
- 2) gli aerogeneratori;
- 3) La cabina di raccolta di campo;
- 4) la SSEU per l'innalzamento della tensione da 30 a 150 kV prima della consegna alla SE di nuova realizzazione di Terna.

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. ELETTRDOTTO MT

Tutti i cavi di cui si farà utilizzo, sia per il collegamento interno dei sottocampi che per la connessione alla SSEU, saranno delle seguenti tipologie:

- Cavi tripolari con anime disposte ad elica visibile e conduttori in alluminio. Tali cavi saranno utilizzati in posa direttamente interrata per l'interconnessione fra gli aerogeneratori e la cabina di raccolta (vedi doc. ELB.PE.06 - Tracciato elettrodotti interno MT su CTR e sezioni tipiche di scavo);
- Cavi unipolari con conduttori in alluminio disposti a trifoglio. Tali cavi saranno utilizzati in posa direttamente interrata per il vettoriamento dell'energia prodotta dal parco eolico dalla cabina di raccolta verso la SSEU adiacente alla SE di nuova realizzazione di Terna (vedi ELB.PE.06 - Tracciato elettrodotti interno MT su CTR e sezioni tipiche di scavo, ELB.PE.07 - SSE Utente-Piante, sezioni e ELB.PE.08 - SSE Utente inquadramento su CTR, catastale e ortofoto).

L'isolante dei cavi è costituito da miscela in elastomero termoplastico HPTE, e fra esso e il conduttore è interposto uno strato di miscela estrusa. Il cavo presenta uno schermo metallico. Sopra lo schermo metallico è presente una guaina protettiva. In generale, per tutte le linee elettriche MT a 30 kV, si prevede la posa direttamente interrata dei cavi ad una profondità media di 1,3 m dal piano di calpestio. (Norma CEI 11-17 - posa tipo M).

L'elettrodotto utente a 30 kV sarà interamente interrato. Lungo il percorso dell'elettrodotto sono presenti fiumi e corsi d'acqua censiti nel P.P.R. e nell'elenco delle acque pubbliche di cui al Regio Decreto 11 dicembre 1933, n. 1775 (vedi Tavola ELB.PE.09 - Tavola ed elenco degli attraversamenti MT).

In caso di particolari attraversamenti o di risoluzione puntuale di interferenze, le modalità di posa saranno modificate in conformità a quanto previsto dalla norma CEI 11-17 e dagli eventuali regolamenti vigenti relativi alle opere interferite, mantenendo comunque un grado di protezione delle linee non inferiore a quanto garantito dalle normali condizioni di posa.

In particolare, per l'attraversamento dei corsi d'acqua suddetti, i cavi saranno posati entro tubi con la tecnica T.O.C. (Trivellazione Orizzontale Controllata), con profondità media di trivellazione pari a 2,3 m.

Per il dettaglio dei tipologici di posa, si rimanda all'elaborato ELB.PE.06 - Tracciato elettrodotti interno MT su CTR e sezioni tipiche di scavo.

La tensione di esercizio dei cavi è pari a 30kV. Le correnti nominali per ciascuna linea sono funzione della potenza vettoriata (vedi documento ELB.PE.01 - Schema unifilare).

La tabella che segue riporta le tipologie e le formazioni dei cavi MT utilizzati nelle diverse sezioni di impianto (La sigla SSEU sta per Sottostazione Elettrica Utente – La sigla WTG indica l'aerogeneratore). 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 REL.PE.01 – Relazione specialistica elettrica).

Partenza linea	Arrivo linea	tipo di cavo	Formazione
WTG-200	Cabina di raccolta	ARG7H1RX 18/30 kV	1x(3x95) mm ²
WTG-201	Cabina di raccolta	ARG7H1RX 18/30 kV	1x(3x240) mm ²
WTG-202	WTG-201	ARG7H1RX 18/30 kV	1x(3x95) mm ²
WTG-203	WTG-202	ARG7H1RX 18/30 kV	1x(3x95) mm ²
WTG-204	Cabina di raccolta	ARG7H1RX 18/30 kV	1x(3x240) mm ²
WTG-205	WTG-204	ARG7H1RX 18/30 kV	1x(3x95) mm ²
Cabina di raccolta	QMT SSEU	ARG7H1R 18/30 kV	1x3x630 mm ²
QMT SSEU	Trafo MT/AT	ARG7H1R 18/30 kV	1x3x630 mm ²

3.2. AEROGENERATORI

Sono previsti n. 6 aerogeneratori del produttore VESTAS, serie EnVentus modello V162-6.0 MW, ciascuno di potenza pari a 6 MW, aventi altezza mozzo 166 m e diametro del rotore 162 m, per complessivi 36 MW.

Ciascun aerogeneratore contiene al suo interno:

- Alternatore asincrono da 6 MW nominali posto nella navicella a 166 metri di altezza;
- Un convertitore (inverter) che adatta la tensione in uscita dal generatore (800 V) a quella in ingresso al trasformatore;
- Trasformatore BT/MT 0,72/30 kV da 7000 kVA posto anch'esso nella navicella;

- Quadro MT dislocato alla base della torre;
- Quadro BT di potenza dislocato nella navicella;
- Quadro BT ausiliari alla base della torre.

3.3. CABINA DI RACCOLTA DI CAMPO

Gli aerogeneratori dell'impianto eolico in progetto fanno capo ad una cabina di raccolta di campo, posta in prossimità del WTG-200, la quale contiene interruttori MT a 30 kV in numero pari agli aerogeneratori connessi. È inoltre presente un interruttore MT generale che avrà in ingresso tutti gli interruttori MT sottesi agli aerogeneratori convergenti alla cabina stessa. Dall'interruttore generale parte una linea interrata a 30 kV fino alla stazione di trasformazione MT/AT (30/150 kV).

3.4. CABINA DI TRASFORMAZIONE MT/AT STEP-UP

La cabina di step-up MT/AT di competenza del Proponente (SSEU), sarà realizzata in prossimità della nuova stazione elettrica di Terna S.p.A.

Il parco eolico in progetto convoglierà l'energia prodotta verso la cabina di step-up MT/AT, connessa alla rete di trasmissione nazionale. La step-up riceve a 30 kV l'energia prodotta dall'impianto eolico tramite una cabina MT. L'edificio ospitante la cabina MT è contenuto all'interno dei confini della cabina MT/AT ed è anch'esso di nuova edificazione.

Successivamente l'energia collettata viene innalzata al livello di tensione della RTN 150 kV tramite un trasformatore 150/30 kV della potenza di 40 MVA. Il trasformatore è connesso allo stallo AT, costituito da organi di misura, protezione e sezionamento in AT isolati in aria, fino a giungere al punto di connessione con l'adiacente SE Terna.

La corrente massima nominale presente sul lato MT della SSEU è pari a 690 A. Sulle sbarre AT del montante generale la corrente massima nominale si riduce a 138 A.

La porzione di impianto AT di utente è dettagliata nella relazione REL.PE.02 Relazione impianto di connessione alla rete (AT).

L'impianto sarà completato dalla sezione MT/BT, posta all'interno della cabina MT, la quale è dettagliata nella relazione REL.PE.01 Relazione specialistica elettrica.

La disposizione in pianta delle strutture sopra descritte è riportata nei documenti di progetto ELB.PE.07 - SSE Utente-Piante, sezioni e ELB.PE.08 - SSE Utente inquadramento su CTR, catastale e ortofoto.

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.

Tabella 4.1: Valori limite di induzione magnetica secondo il DPCM 8/07/2003

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 (Da intendersi come mediana dei valori nell'arco di 24 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 **5 kV/m**, inteso come valore efficace.

A tal proposito il documento: "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", afferma che: "Il campo elettrico al suolo in prossimità di elettrodotti a tensione uguale o inferiore a 150 kV, come da misure e valutazioni, non supera mai il limite di esposizione per la popolazione di 5 kV/m".

Il campo elettrico non viene quindi analizzato in quanto il valore limite di 5 kV/m non si raggiunge con le tensioni in gioco.

4.3. METODOLOGIA DI CALCOLO

La metodologia di calcolo qui utilizzata è basata sull'algoritmo bidimensionale normalizzato nella CEI 211-4, considerato idoneo per la maggior parte delle situazioni pratiche riscontrabili per le linee aeree e in cavo interrato.

Tale metodo, descritto nella guida CEI 106-11, alla quale si rimanda per i dettagli, è anche citato come utilizzabile nel Decreto 29/5/2008 per condizioni come quelle allo studio.

Si tratta di un modello bidimensionale che applica la legge di Biot e Savart per determinare l'induzione magnetica dovuta a ciascun conduttore percorso da corrente e quindi la legge di sovrapposizione degli effetti per determinare l'induzione magnetica totale, tenendo ovviamente conto delle fasi delle correnti, supposte simmetriche ed equilibrate.

Le formule di calcolo del campo magnetico nel generico punto P sono pertanto le seguenti, con riferimento alla fig. 4 estrapolata dalla Norma CEI 106-11 e di seguito riportata:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$$
$$B_x = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_i I_i \left[\frac{y_i - y_p}{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} \right]$$
$$B_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_i I_i \left[\frac{x_i - x_p}{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} \right]$$
$$B_z = 0$$

Con:

- i = numero conduttori
- μ_0 = permeabilità magnetica del vuoto = $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]
- I_i = fasore della corrente [A_{eff}]

Il calcolo del campo magnetico è stato effettuato utilizzando il software "Magic" di BEShielding di cui riportiamo in allegato il documento di validazione. Il software permette di calcolare i campi magnetici generati da sorgenti di tipo elettrico, quali trasformatori, sistemi di linee elettriche, cabine MT/BT, buche giunti, blindosbarre e impianti elettrici.

Il software permette la determinazione delle fasce di rispetto per linee elettriche e cabine MT/BT, secondo quanto previsto dalla Legge Quadro n. 36/2001 (esposizione ai campi magnetici della

popolazione) e dal D.Lgs. n. 81/08 (valutazione dei rischi in ambiente lavorativo). Permette inoltre di studiare le singole sorgenti (linee elettriche, cavi, sistemi multiconduttori, trasformatori) mediante configurazioni bidimensionali e tridimensionali attraverso l'integrazione della legge di Biot-Savart o lo studio di sistemi complessi, come le cabine elettriche MT/BT, tenendo conto della tridimensionalità delle sorgenti, della loro reale posizione e della sovrapposizione degli effetti delle diverse componenti la cabina.

Inoltre, costituiscono riferimento anche i casi di calcolo trattati nel documento sulle linee guida E-Distribuzione per la determinazione della DPA.

5. CAMPO MAGNETICO

5.1. ELETTRDOTTO MT

Per l'elettrodotto è necessario determinare la DPA secondo le modalità descritte in precedenza.

Il dettaglio del tipico di posa che segue è estratto dall'elaborato ELB.PE.06.

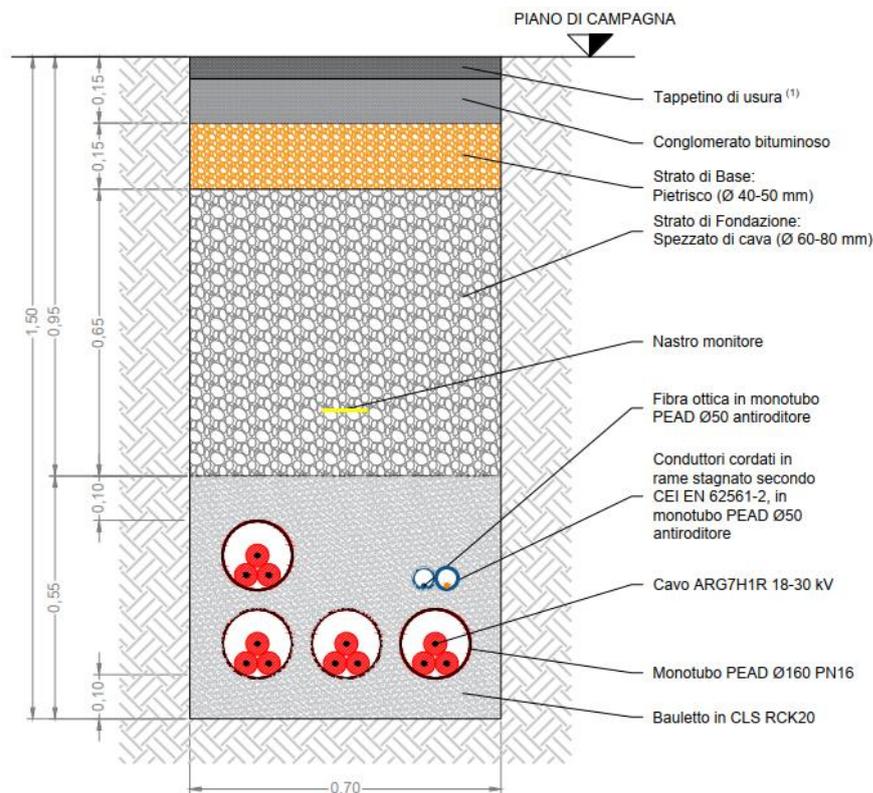


Figura 5.1: sezione stradale cavidotto di connessione a SSEU

La configurazione precedente è quella relativa alla situazione ove è presente il valore di corrente nominale più grande, e viene preso come caso di riferimento (situazione cautelativa rispetto a quella reale). In questo caso abbiamo n. 4 terne di cavo ARG7H1R 18/36 kV unipolare con formazione a trifoglio, e la corrente totale trasportata è pari a 690 A.

L'analisi del campo magnetico generato dalle linee MT interrate, è stata condotta utilizzando un software specifico che utilizza le metodologie di calcolo della Norma CEI 211-4. In appendice alla presente relazione è allegato il "Documento di Validazione" dei calcoli fornito dal produttore del software stesso (Beshielding S.r.l.). I risultati di tale analisi sono riportati graficamente nella presente relazione.

Per il calcolo è pertanto stato effettuato utilizzando le seguenti assunzioni:

- disposizione geometrica delle terne a trifoglio;
- cavi di una medesima terna a contatto;
- interasse tra le terne pari a 20 cm;

- disposizione delle fasi non ottimizzata (RST – RST – RST - RST) con ripartizione uniforme nella corrente;
- profondità di posa su due strati, il primo a 110 cm ed il secondo a 130 cm.

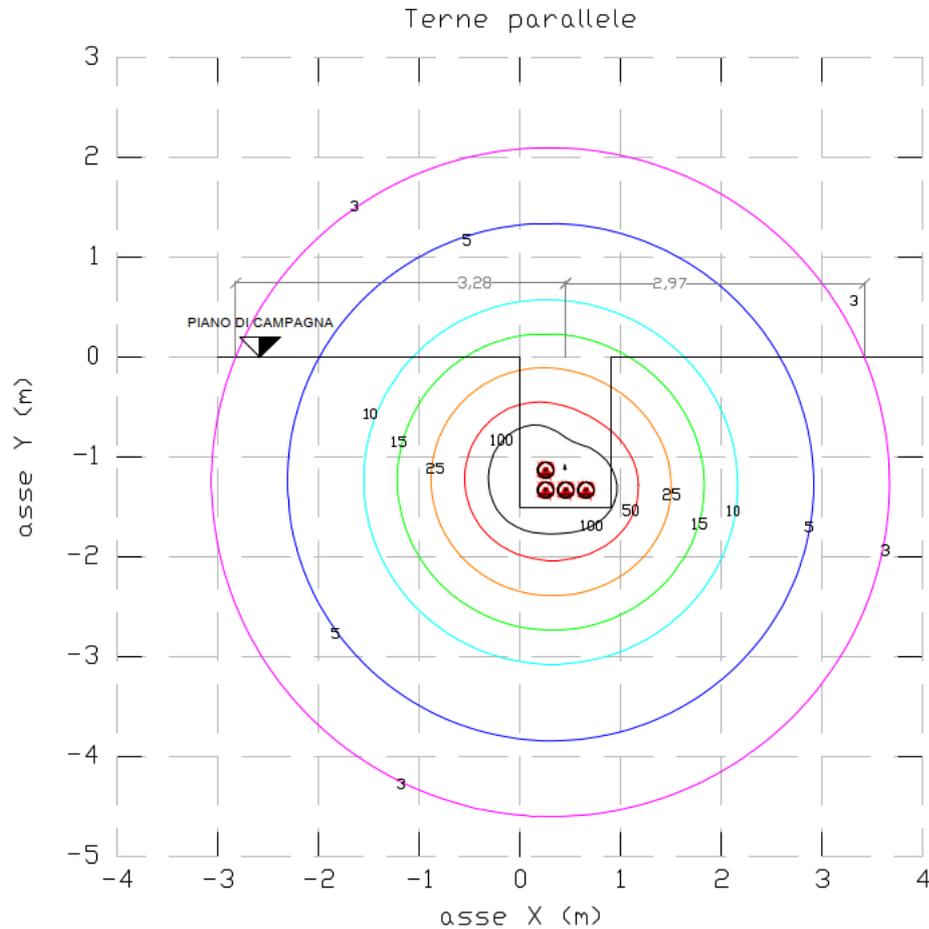


Figura 5.2: curve di induzione magnetica per elettrodotto MT (configurazione non ottimizzata)

Come evidenziato dal diagramma precedente, la fascia di rispetto al livello del suolo si deduce dall'intersezione tra la linea del terreno e la curva isolivello a $3 \mu\text{T}$, che è pari a 3,28 m.

La DPA, così come definita nel DM 29/05/08, risulta essere l'approssimazione al metro superiore, ovvero pari a 4 m, la quale determina una fascia di rispetto totale pari a 8 m.

Il seguente diagramma invece mostra le curve di induzione magnetica risultanti nel caso si utilizzi una disposizione dei cavi ottimizzata (RST – STR – TRS – STR). Come si nota, in tal caso i valori si riducono grandemente arrivando al punto da non raggiungere il valore di qualità di $3 \mu\text{T}$ a livello del piano di campagna.

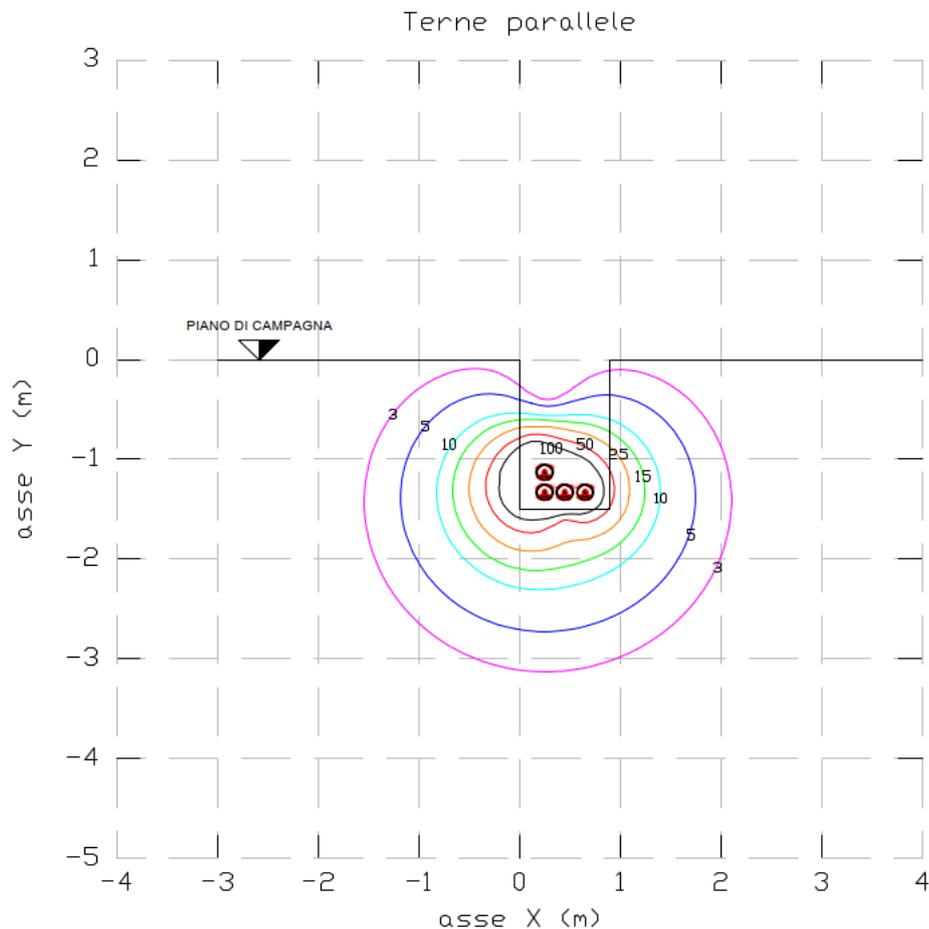


Figura 5.3: curve di induzione magnetica per elettrodotto MT (configurazione ottimizzata)

Si sconsiglia invece la disposizione in piano, in quanto in tal caso i valori di induzione magnetica aumenterebbero.

Inoltre, tali valori sono ottenuti per la portata nominale dei cavi come (prescritto dalla norma). Nel caso del parco in oggetto, la corrente massima che impegna i cavi è in realtà molto inferiore a quella utilizzata nei citati calcoli.

5.2. AEROGENERATORI

Anche l'analisi del campo magnetico generato dagli aerogeneratori è stata condotta utilizzando il software Beshielding descritto nel precedente capitolo ed è quindi in accordo alle metodologie di calcolo della Norma 211-4.

I valori dell'induzione magnetica all'esterno di ciascun aerogeneratore sono stati ricavati considerando il componente interno che è in grado di determinare i campi magnetici più intensi. Tale componente è il trasformatore MT/BT posizionato nella navicella a 166 metri di altezza. Il motivo di tale scelta è giustificato dal fatto che, nel suddetto trasformatore e nei cavi che da esso si dipartono, circolano le massime correnti (lato BT a 720 V) e gli effetti dei campi magnetici prodotti non possono essere compensate con la trasposizione delle fasi. Il grafico seguente mostra come, all'esterno di ciascun aerogeneratore, la distanza oltre la quale il campo di induzione magnetica $B <$

3 μ T è sempre inferiore a 3 m sia in orizzontale sia in verticale. Si assume pertanto, per tutti gli aerogeneratori, una DPA = 3 m sia in orizzontale sia in verticale a partire dalle pareti dell'aerogeneratore stesso.

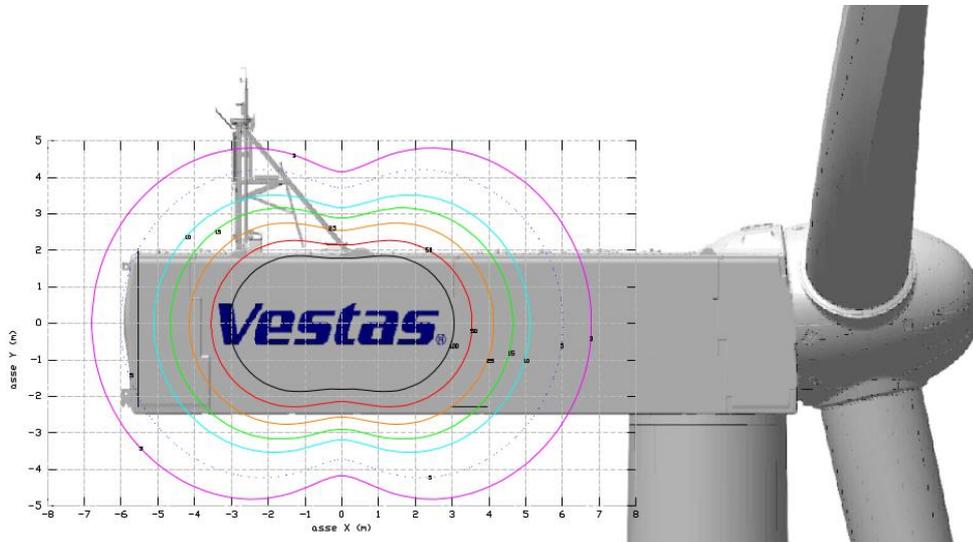


Figura 5.4: curve di induzione magnetica per la navicella dell'aerogeneratore

Occorre inoltre tenere conto anche del campo generato dal quadro MT posto alla base della torre. In questo caso, la situazione cambia molto a seconda dell'aerogeneratore che si sta osservando:

Aerogeneratore	Corrente in ingresso	Corrente in uscita
WTG-200	-	115
WTG-201	230	345
WTG-202	115	230
WTG-203	-	115
WTG-204	115	230
WTG-205	-	115

Mettiamoci in via cautelativa nella situazione più gravosa, ovvero quella nella quale sono presenti le correnti maggiori, che ritroviamo nel WTG-201.

La disposizione delle curve del campo di induzione magnetica, come si può vedere nel grafico seguente, mostra che l'isolinea a 3 μ T è sempre contenuta all'interno del perimetro della base della torre dell'aerogeneratore.

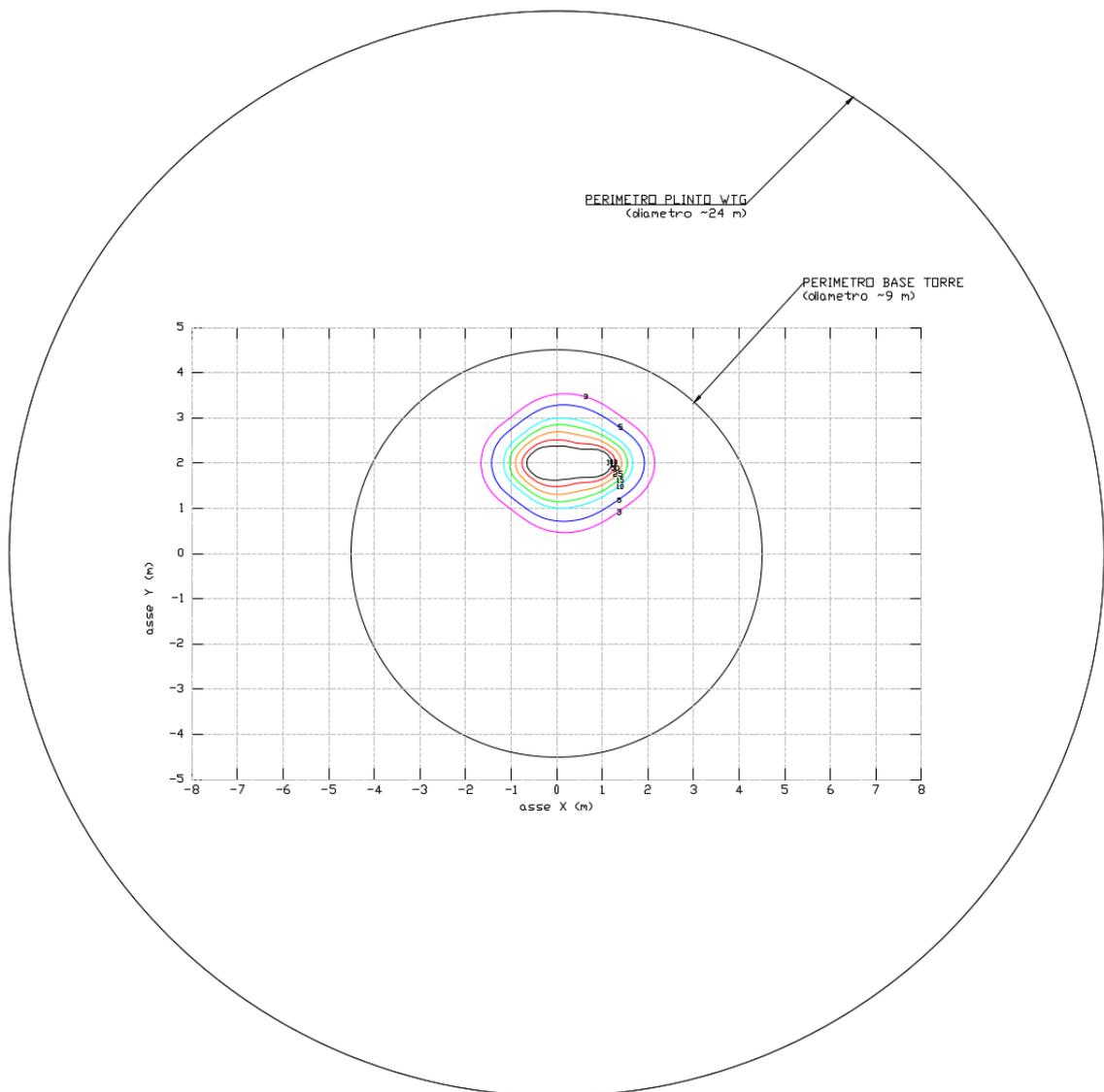


Figura 5.5: curve di induzione magnetica per la torre dell'aerogeneratore

5.3. CABINA DI RACCOLTA DI CAMPO

La cabina di raccolta di campo è una potenziale fonte di campi magnetici per l'entità delle correnti in ingresso ed in uscita dalla stessa. Ai fini della valutazione sono state considerate le correnti che interessano i 4 interruttori AT presenti all'interno della cabina. L'analisi del campo magnetico è stata condotta utilizzando anche in questo caso il software Beshielding già descritto e quindi secondo le metodologie di calcolo della Norma 211-4.

Sono state considerate:

- 3 correnti in ingresso, corrispondenti ai 3 aerogeneratori connessi, pari rispettivamente a 115, 345 e 230 A;
- 1 corrente in uscita, pari a 690 A, pari alla somma delle correnti convogliate verso la SSEU.

Il risultato ottenuto è rappresentato nelle tavole seguenti. Come si nota, all'esterno della cabina presa in esame, la distanza oltre la quale il valore dell'induzione magnetica $B < 3 \mu\text{T}$ risulta di 1,30 m in orizzontale. Per la DPA si assumerà un valore di 1,5 m in orizzontale.

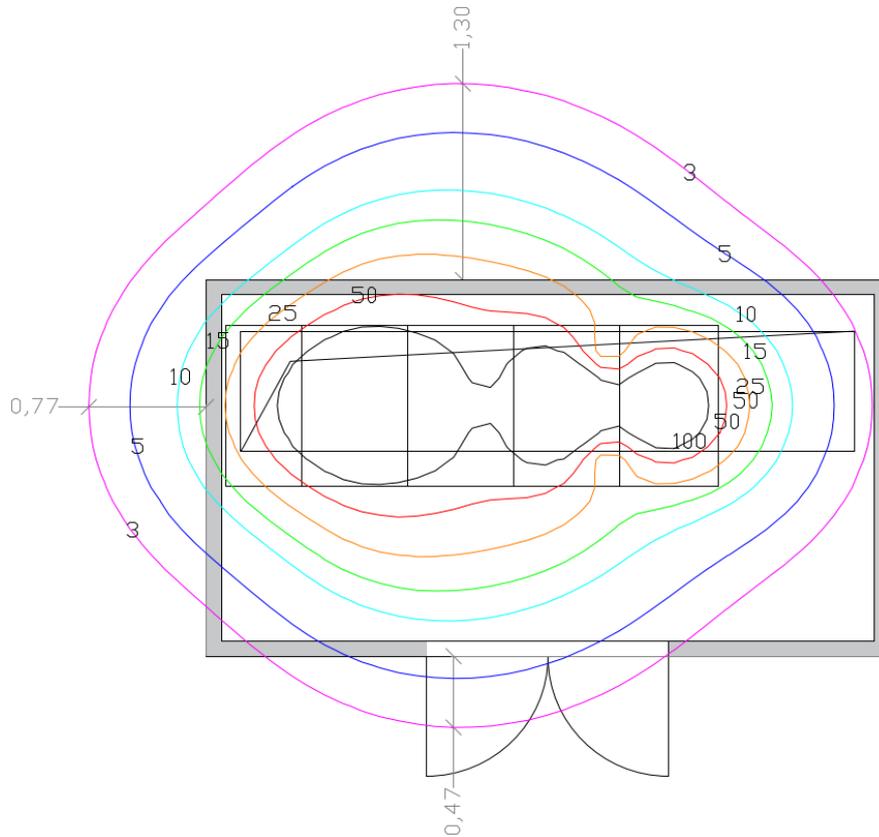


Figura 5.6: curve di induzione magnetica per cabina di campo – vista in pianta

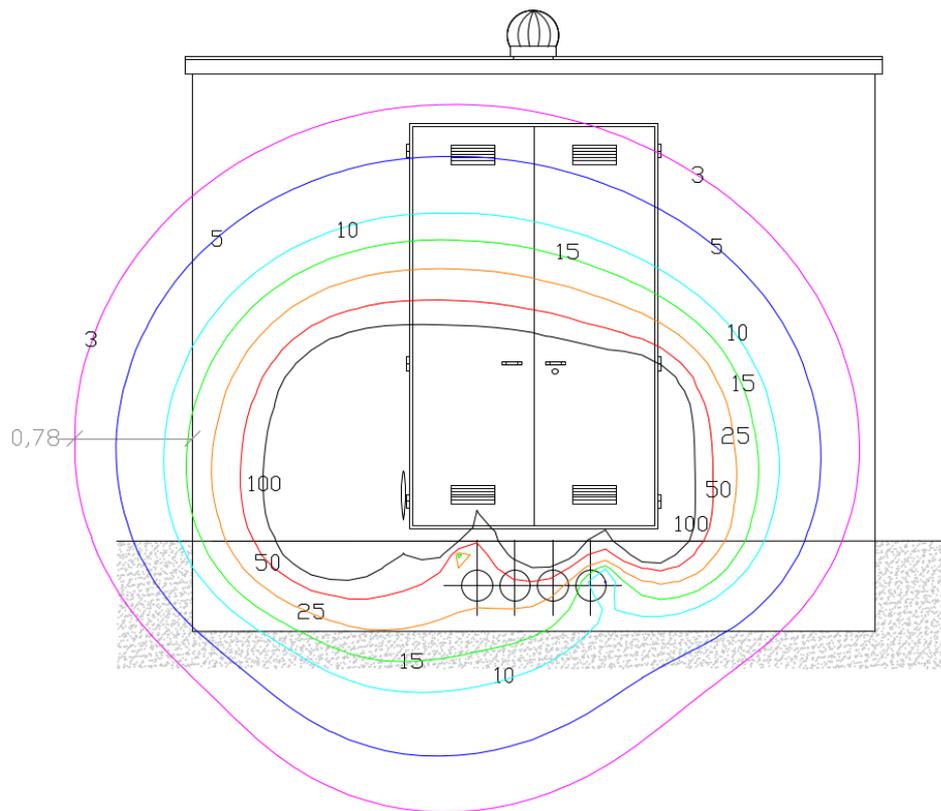


Figura 5.7: curve di induzione magnetica per cabina di campo – vista frontale

5.4. CABINA DI TRASFORMAZIONE MT/AT STEP-UP

La stazione di trasformazione AT/MT a 150/30 kV è una potenziale sorgente di campi magnetici. Con riferimento alla valutazione dei campi elettromagnetici generati dalla SSEU 30/150 kV, sono state individuate le seguenti possibili sorgenti in grado di generare un campo elettromagnetico significativo determinando dunque l'opportunità di osservare la relativa distanza di prima approssimazione (DPA):

- Sbarre A.T. a 150 kV in aria;
- Condutture in cavo interrato o in aria a tensione nominale 30 kV.

Le altre possibili sorgenti di onde elettromagnetiche di minore rilevanza (linee BT, trasformatori MT/BT, trasformatore MT/AT, quadri MT, quadri BT, apparecchiature BT), sono state giudicate non significative ai fini della presente valutazione, come peraltro riscontrato anche nella letteratura di settore. Trattandosi di una cabina primaria isolata in aria, il D.M.29/05/08, allegato APAT, par. 5.2.2, non prevede di dover ricorrere al calcolo dei campi generati, in quanto le DPA, e quindi le fasce di rispetto, ricadono all'interno dell'area di pertinenza della stessa cabina.

Ad ulteriore conferma di quanto appena riportato, il gestore di rete e-distribuzione S.p.a., nel documento "Linee Guida per l'applicazione del p.5.1.3 dell'Allegato al DM 29-05-2008 – Distanza di prima approssimazione (DPA) da linee e cabine elettriche" riporta le DPA da applicare per le sottostazioni di trasformazione analoghe a quella oggetto della presente relazione. In particolare, nell'allegato A al sopracitato documento, vengono riportate le distanze minime da garantire del

centro sbarre AT e dal centro sbarre MT rispetto al perimetro dell'area della sottostazione. Nella pagina seguente si riporta lo schema tratto dalle suddette linee guida di e-distribuzione.

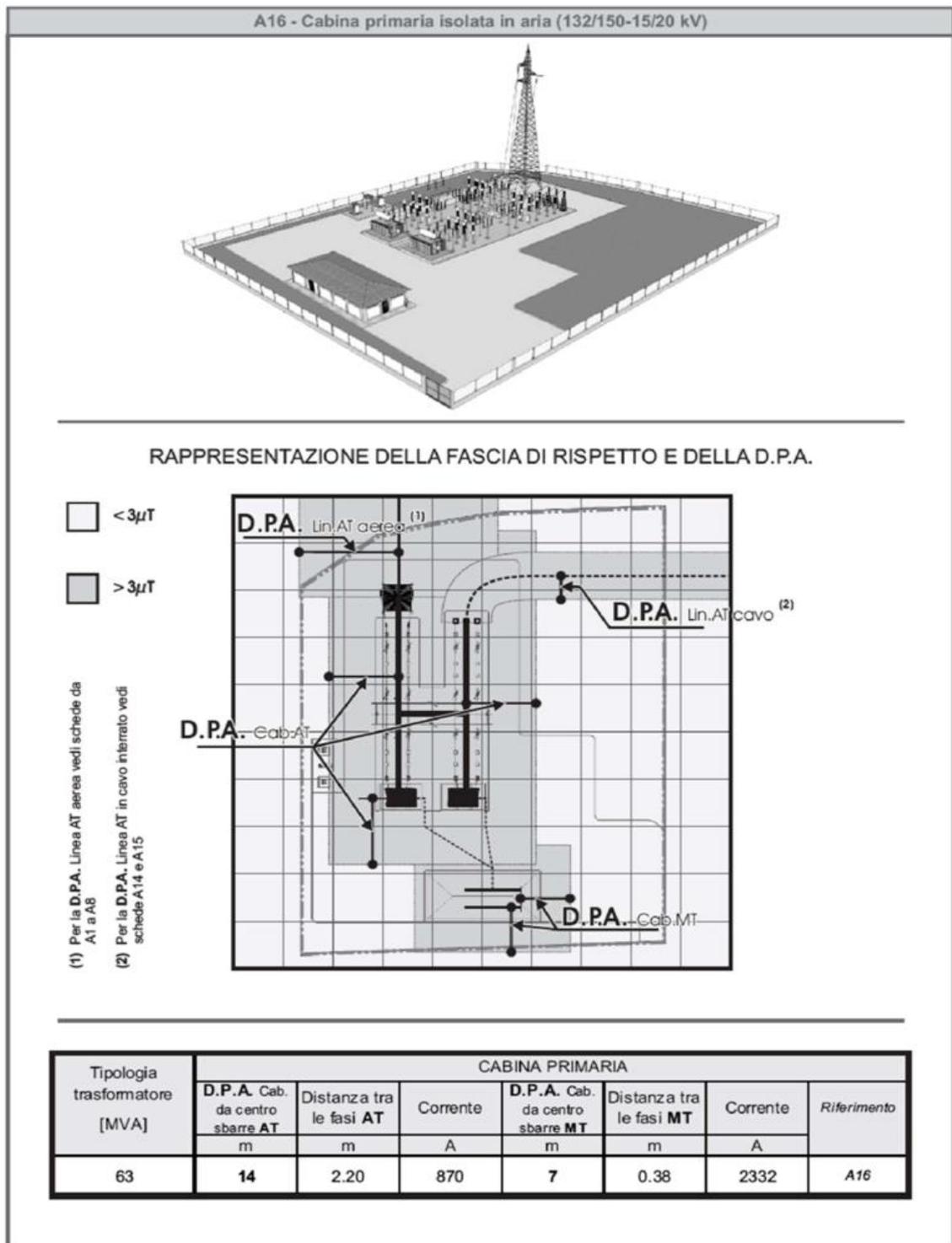


Figura 5.8: estratto da Linea Guida per l'applicazione del § 5.1.3 dell'Allegato al DM 29.05.08

Dallo schema si ricava, per sistemi con caratteristiche analoghe a quelle della sottostazione in oggetto, che le DPA risultano essere:

- 14 m dal centro sbarre AT;
- 7 m dal centro sbarre MT.

È opportuno fare le seguenti considerazioni:

- La corrente lato AT considerata da e-distribuzione per la determinazione delle DPA sopra riportate è pari a 870 A. Nel caso in esame, come già detto in precedenza, la massima corrente AT è pari a 138 A;
- La massima corrente sulle sbarre MT a 30 kV è pari a 690 A contro i 2332 A dello schema tipo di e-distribuzione.

Ne consegue che, nel caso in esame, le DPA reali sono inferiori a quelle dello schema tipo.

Pertanto, si può concludere che le fasce di rispetto di questa tipologia di impianti rientrano nei confini dell'area di pertinenza dei medesimi. Il campo elettromagnetico alla recinzione è sostanzialmente riconducibile ai valori generati dalle linee entranti.

È comunque facoltà dell'Autorità competente richiedere il calcolo, qualora lo ritenga opportuno, delle fasce di rispetto relativamente agli elementi perimetrali (es. portali, sbarre, ecc).

6. 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).

Dai calcoli effettuati non si segnalano situazioni particolari, in quanto l'entità delle fasce di rispetto e delle conseguenti Distanze di Prima Approssimazione (DPA) determina la possibilità di rispetto dei vincoli verso eventuali luoghi tutelati, così come evidenziato nelle planimetrie allegate.

Relativamente all'elettrodotto di connessione alla cabina primaria, in corrispondenza di eventuali cambi di direzione, parallelismi e incroci con linee MT o BT sono riportate le aree di prima approssimazione. In particolare, con riferimento al DM 29/05/08, tali vincoli risultano soddisfatti nella misura in cui le eventuali zone sensibili risultano ad una distanza superiore alla DPA calcolata alla portata nominale di ciascuna linea.

7. INDICE DELLE FIGURE

Figura 5.1: sezione stradale cavidotto di connessione a SSEU.....	13
Figura 5.2: curve di induzione magnetica per elettrodotto MT (configurazione non ottimizzata).....	14
Figura 5.3: curve di induzione magnetica per elettrodotto MT (configurazione ottimizzata)	15
Figura 5.4: curve di induzione magnetica per la navicella dell'aerogeneratore	16
Figura 5.5: curve di induzione magnetica per la torre.....	17
Figura 5.6: curve di induzione magnetica per cabina di campo – vista in pianta.....	18
Figura 5.7: curve di induzione magnetica per cabina di campo – vista frontale.....	19
Figura 5.8: estratto da Linea Guida per l'applicazione del § 5.1.3 dell'Allegato al DM 29.05.08.....	20

8. APPENDICE

- documento di validazione software "Magic" di BESHielding



Documento di Validazione

Algoritmi di calcolo del software **MAGIC**[®] (**MAG**netic Induction Calculation)

Revisione	Data	Elaborato	Approvato
05	11/01/2021	M.F.	S.G.
00 Emissione	07/01/2014	D.B.	M.M.



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.....	7
2.1 Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato	7
2.2 Validazione sperimentale del modulo tridimensionale.....	8
3 Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza	9
3.1 Verifica del modello MAGIC della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method).....	9
3.2 Verifica del modello MAGIC del trasformatore completo con misure sperimentali	12
Conclusioni	13

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:

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

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}_I e \bar{u}_r indicano, rispettivamente, il verso della corrente e della relativa normale; \times indica il prodotto vettoriale.

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

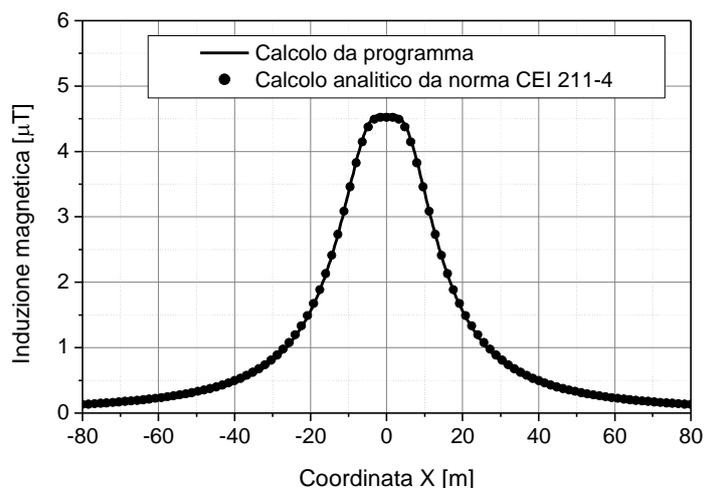


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

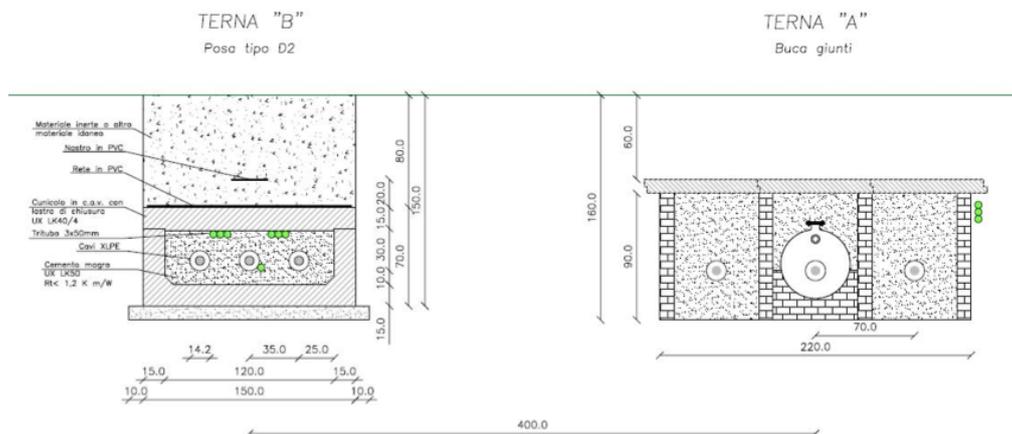


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

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.

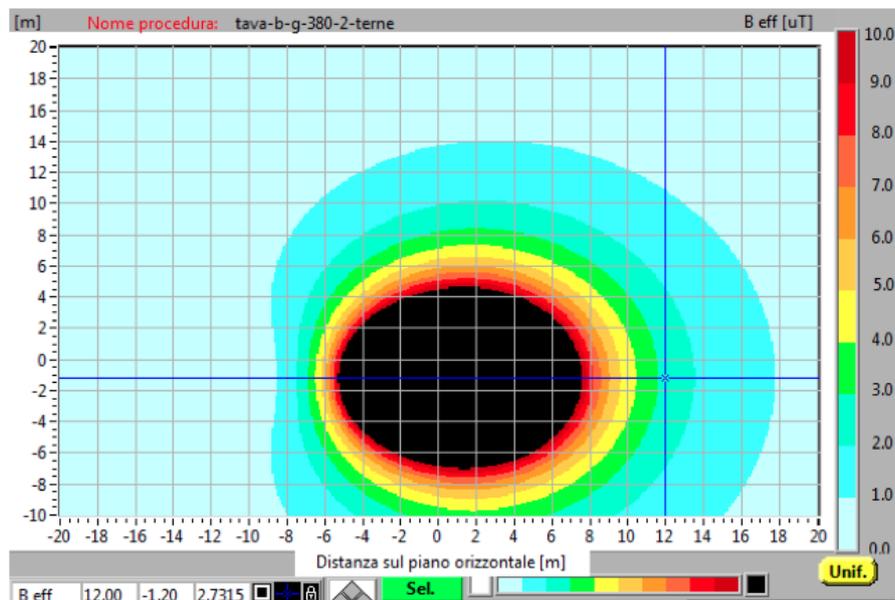


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.

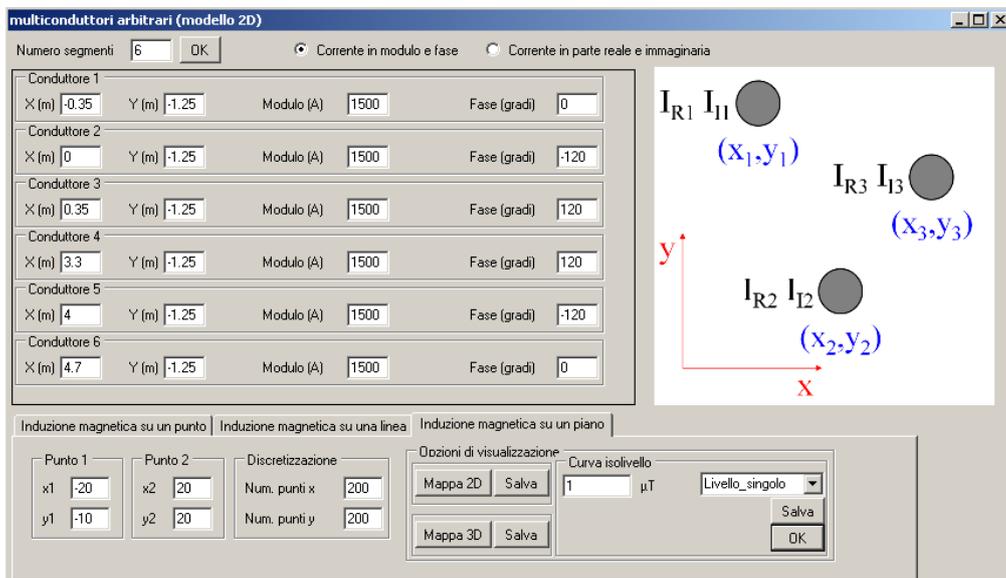


Figura 4: Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)”: dati definizione geometria e sorgenti

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

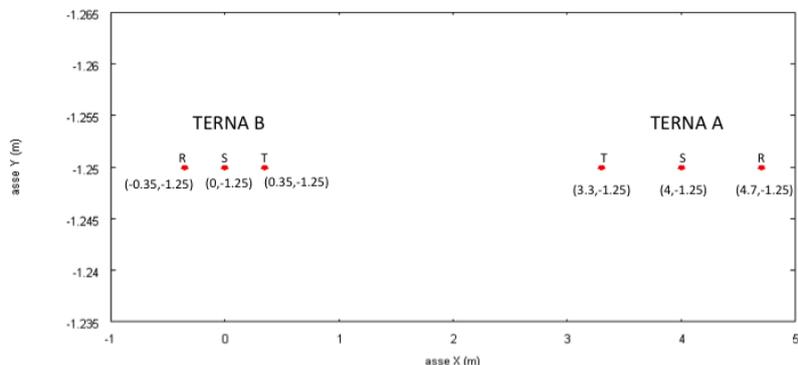


Figura 5: Geometria sorgenti

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

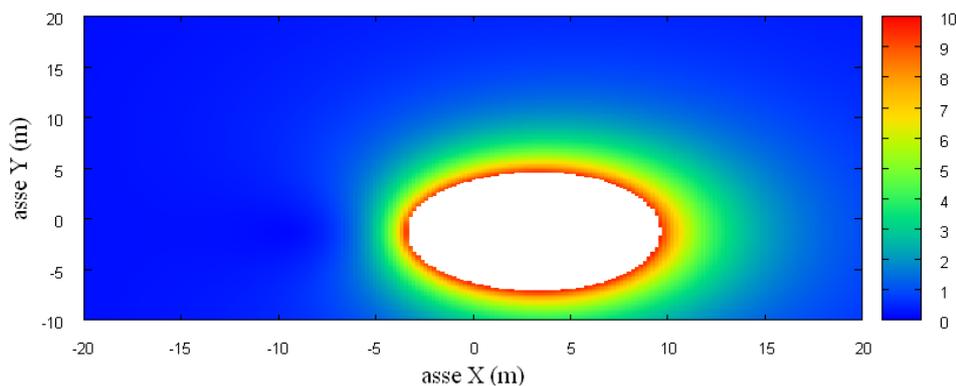


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

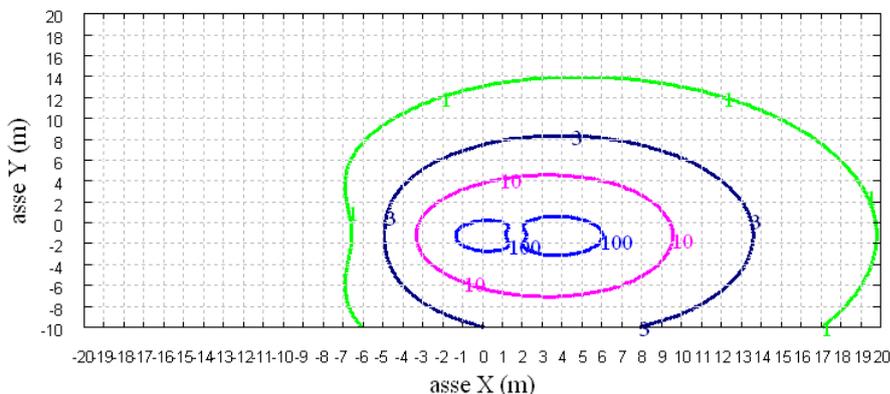
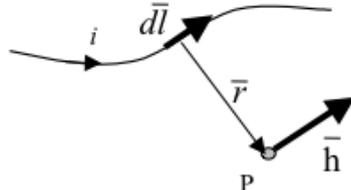


Fig. 7 Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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:

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

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.

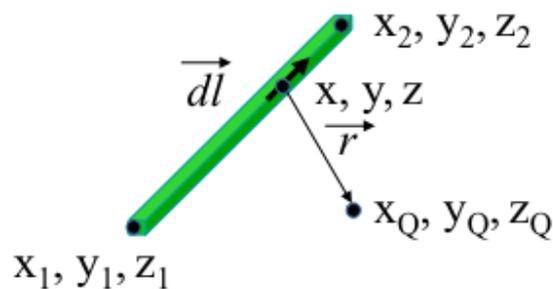


Fig. 8: Modello del segmento.

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 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.

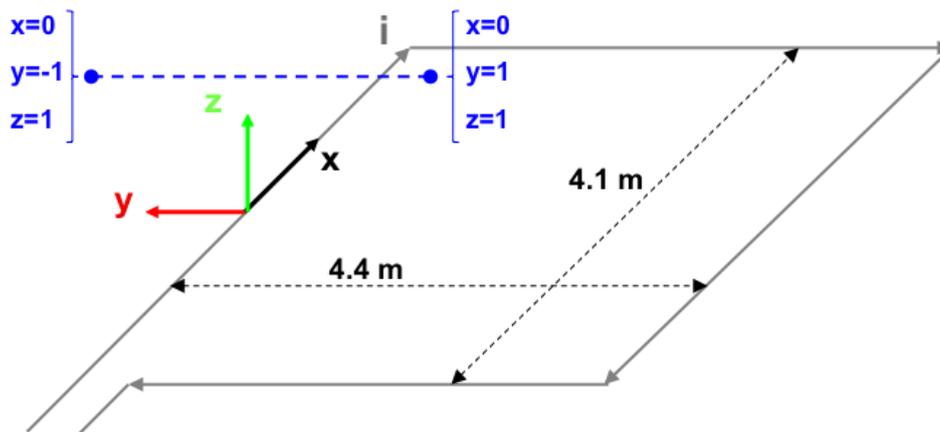


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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 estende 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.

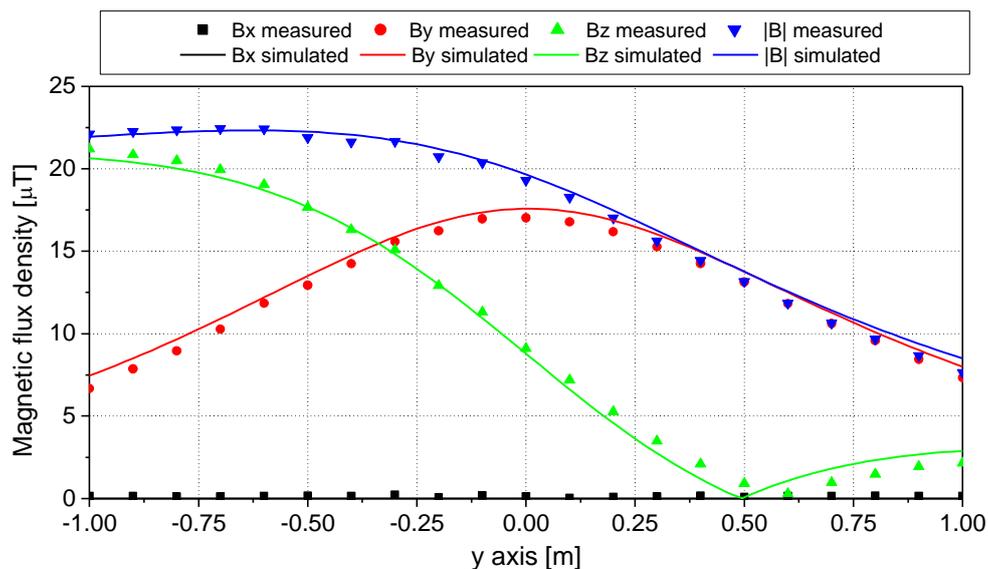


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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 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.

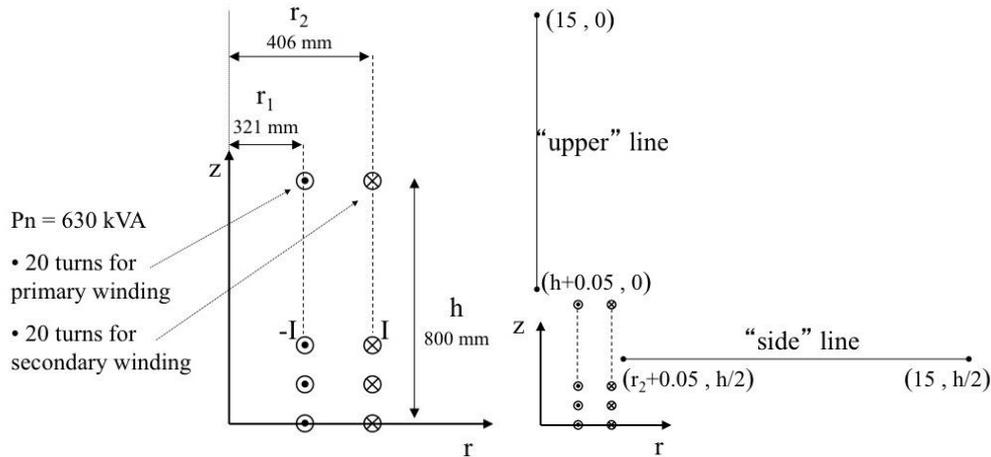


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

Le Fig. 12 e 13 mostrano, rispettivamente, i valori di induzione magnetica lungo la linea ad 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 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 secondario (I_{R1} o I_{R2}) e corrispondentemente occorre considerare le spire di primario o secondario (N_1 e N_2).

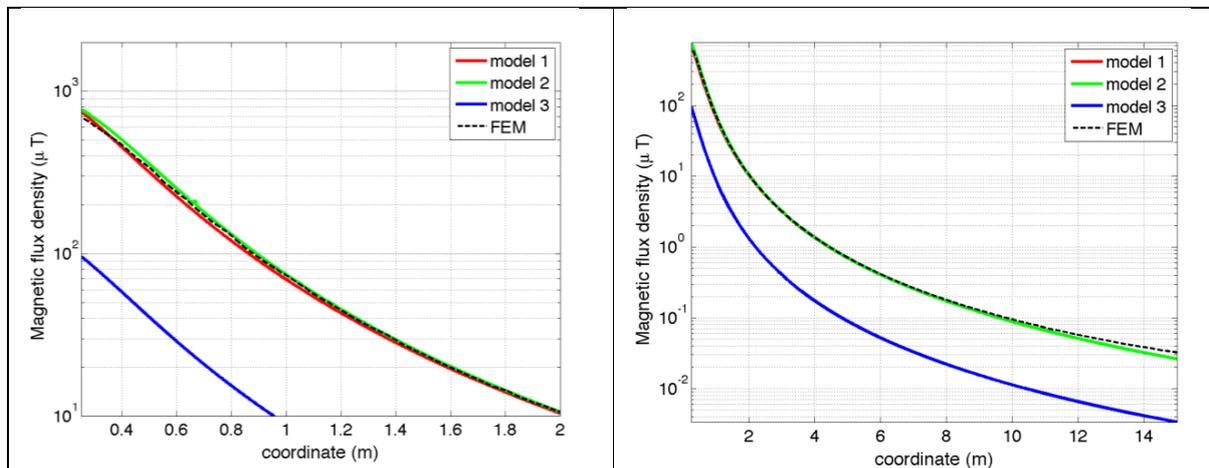


Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale

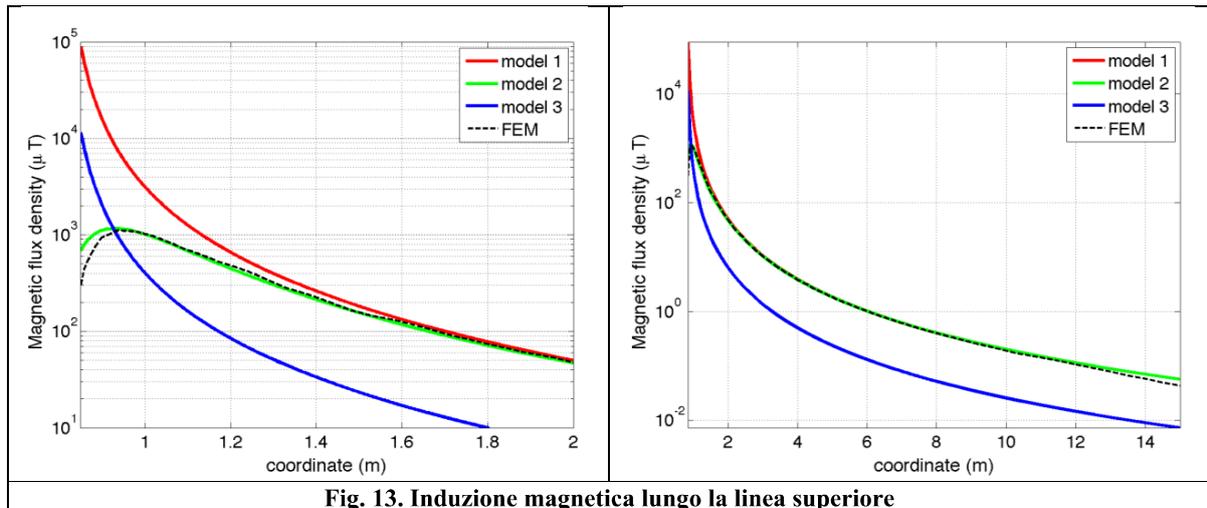


Fig. 13. Induzione magnetica lungo la linea superiore

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 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.

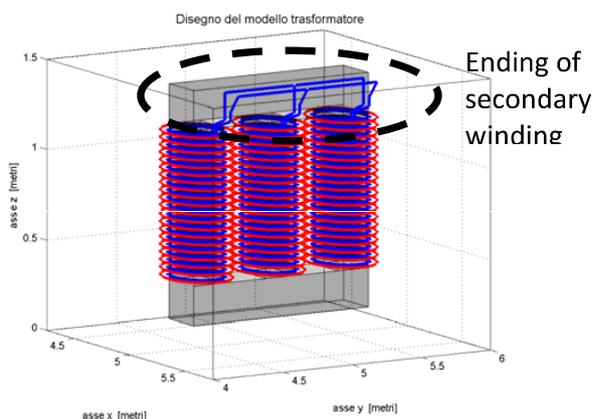


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

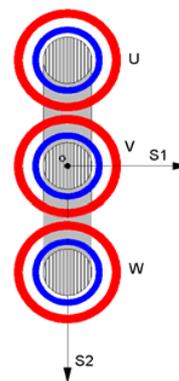


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

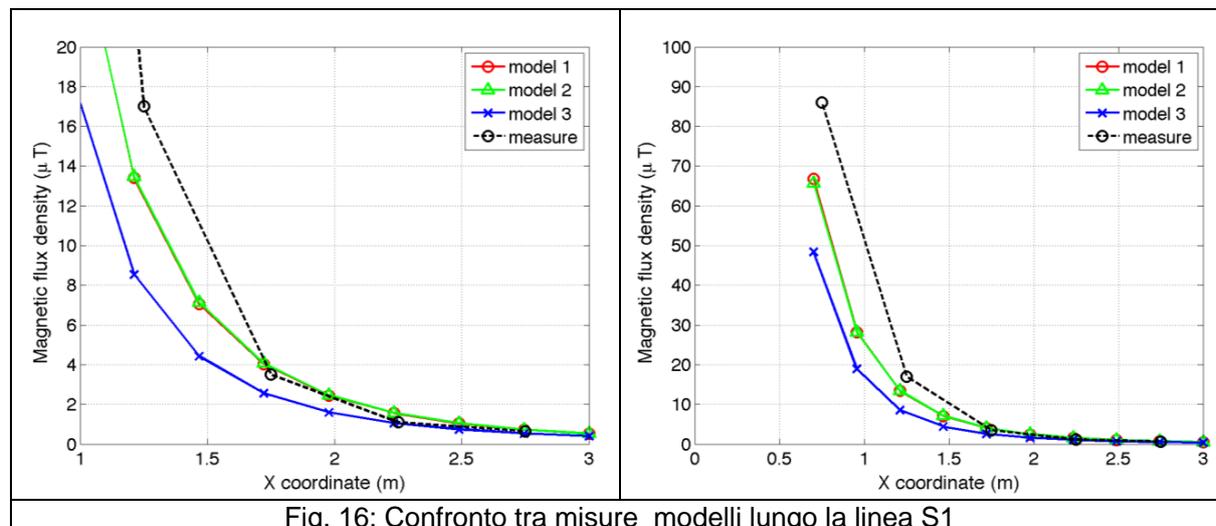


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

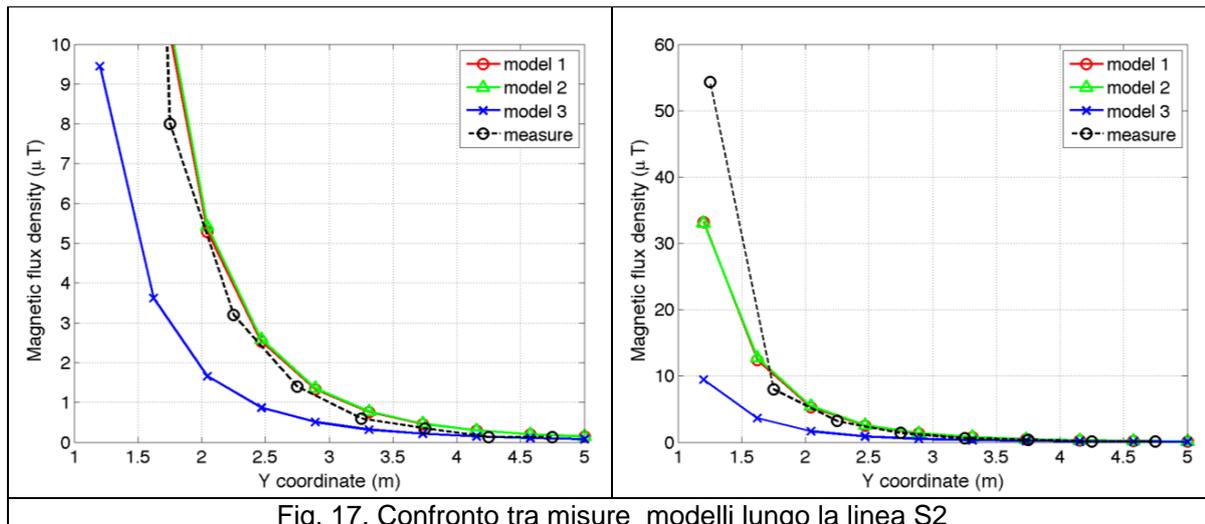


Fig. 17. Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

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 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.