



REGIONE SARDEGNA



PROVINCIA SUD SARDEGNA



SEUI



ESCALAPLANO



ESTERZILI

**PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO EOLICO
 COMPOSTO DA 12 AEROGENERATORI CON POTENZA COMPLESSIVA DI
 57 MW NEL COMUNE DI SEUI (SU), CON OPERE CONNESSE NEI COMUNI
 DI SEUI (SU), ESCALAPLANO (SU) ED ESTERZILI (SU)**



PropONENTE



LOTO RINNOVABILI SRL

Largo Augusto n.3 20122
Milano
pec:lotorinnovabili@legalmail.it

PROGETTAZIONE



AGREENPOWER s.r.l.

Sede legale: Via Serra, 44
09038 Serramanna (SU) - ITALIA
Email: info@agreenpower.it

Gruppo di lavoro:

Ing. Simone Abis - Civile Ambientale
Ing. Michele Angel - Elettrico
Ing. Enea Tocco - Civile Ambientale
Ing. Stefano Fanti - Civile Ambientale
Dott. Gianluca Fadda

Collaboratori:

Vamirgeoind Ambiente Geologia e Geofisica S.r.l
Ing. Gianluca Vultaggio - Tekto Studio
Ing. Nicola Sollai - Strutturista
Dott.ssa Archeologa Manuela Simbula
Dott. Naturalista Francesco Mascia
Dott. Agronomo Vincenzo Sechi
Ing. Federico Miscali - Tecnico Acustica
Dott. Geologo Luigi Sanciu
Ing. Luigi Cuccu - Elettrotecnico
Ing. Davide Medici - Analisi Anemologica

ELABORATO

Nome Elaborato:

RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI

00	Novembre 2022	Prima emissione	Agreenpower Srl	Agreenpower Srl	Agreenpower Srl
Rev.	Data	Oggetto della revisione	Elaborazione	Verifica	Approvazione
Scala:	-				
Formato:	A4	Codice Commessa	W2203SEU	Codice Elaborato	REL. PE.03

Sommario

1. GENERALITÀ	3
1.1. Descrizione del progetto.....	3
1.2. Tipo e ubicazione dell'immobile.....	3
1.3. Caratteristiche generali.....	3
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	4
3. FONTI DI EMISSIONE	4
3.1. Elettrodotto MT.....	5
3.2. Aerogeneratori.....	6
3.3. Cabina Master.....	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	11
5. CAMPO MAGNETICO GENERATO DAGLI ELETTRODOTTI.....	11
5.1. Elettrodotti con cavo ARG7H1RX-30 kV tripolare cordato ad elica visibile.....	12
5.2. Elettrodotti con cavo ARG7H1R-30 kV unipolare.....	12
6. CAMPO MAGNETICO GENERATO DAGLI AEROGENERATORI.....	12
7. CAMPO MAGNETICO GENERATO DALLE CABINE DI RACCOLTA (CABINE MASTER).....	13
8. CAMPO MAGNETICO GENERATO DALLA CABINA MT/AT UTENTE (SSEU).....	13
9. CONCLUSIONI.	15
9.1. Elettrodotti MT.....	15
9.2. Aerogeneratore	15
9.3. Cabina Master.....	15
9.4. Stazione MT/AT utente (SSEU).	15
10. DOCUMENTO DI VALIDAZIONE SOFTWARE DI CALCOLO.....	17

1. GENERALITÀ

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 "*Sedda Meddau*" ed è costituito da n. 12 aerogeneratori del produttore NORDEX, serie Delta 4.000 modello N163/5.X TS118-00, ciascuno di potenza pari a 5,7 MW ma declassati alla potenza nominale di 4,75 MW, aventi altezza mozzo 118 m e diametro del rotore 163 m, per complessivi 57 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 21/10/2021 - codice pratica 202101584 - 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" 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 Sottostazione Elettrica Utente sarà trattata nel documento di progetto REL.PE.02 - Relazione di impianto di connessione alla rete (AT).

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'immobile

L'impianto eolico è situato in agro dei Comuni di Seui, Esterzili e Escalaplano (SU).

La linea elettrica MT a 30 kV interrata, che connette il sito di produzione alla Sottostazione Elettrica Utente (SSEU), è dislocata nei Comuni di Seui, Esterzili e Escalaplano (SU). La Sottostazione Elettrica Utente si trova nei comuni di Seui e Escalaplano (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. **12** aerogeneratori con potenza nominale di **4,75 MW** ciascuno per una potenza nominale totale di **57 MW**.

Dieci aerogeneratori (dei 12 previsti) sono raggruppati in 3 sottocampi (gruppi). I generatori di ciascun gruppo sono raccolti in opportune cabine di raccolta MT, secondo il seguente schema:

- Cabina Gruppo SE-01
 - Aerogeneratore SE-01
 - Aerogeneratore SE-02
 - Aerogeneratore SE-05
 - Aerogeneratore SE-07
- Cabina Gruppo SE-03
 - Aerogeneratore SE-03
 - Aerogeneratore SE-04
 - Aerogeneratore SE-09
- Cabina Gruppo SE-06
 - Aerogeneratore SE-06
 - Aerogeneratore SE-08

- Aerogeneratore SE-10

Gli aerogeneratori SE-11 e SE-12 sono connessi direttamente alla SSEU.

Lo schema di collegamento degli aerogeneratori è riportato sul documento di progetto *ELB.PE.01b - Schema a blocchi opere elettriche*.

Ai 3 sottocampi (gruppi) corrispondono **3 linee MT a 30 kV in cavo unipolare ARG7H1R interrato** che collegano le rispettive cabine di raccolta dell'impianto alla sottostazione MT/AT (step-up). Gli aerogeneratori SE-11 e SE-12 vengono connessi direttamente con cavo **tripolare elicordato ARG7H1RX interrato**.

All'interno di ciascun sottocampo, gli aerogeneratori sono collegati alla rispettiva cabina di raccolta (cabina di parallelo o cabina master), con distribuzione radiale, mediante linee **MT a 30 kV in cavo ARG7H1RX-30 kV tripolare elicordato interrato**.

Ciascun aerogeneratore contiene al suo interno:

- Un alternatore asincrono da 4,75 MW nominali posto nella navicella a 118 metri di altezza;
- Un trasformatore BT/MT 0,750/30 kV da 6350 kVA posto anch'esso nella navicella;
- Un quadro MT dislocato alla base dalla torre;
- Quadro BT di potenza dislocato nella navicella;
- Quadro BT ausiliari alla base della torre.

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Nel presente progetto 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 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 le cabine “Master” di raccolta;
 - b) elettrodotto MT di vettoriamento dell’energia prodotta dal parco eolico verso la SSEU adiacente alla SE;
- 2) gli aerogeneratori;
- 3) Le cabine Master di raccolta dei gruppi di aerogeneratori;
- 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. Elettrodotto 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 le rispettive cabine di raccolta (vedi doc. *ELB.PE.01f - Tracciato elettrodotti (interno) MT su CTR e sezioni tipiche di scavo*).
- Cavi unipolari con conduttori in alluminio disposti in piano. Tali cavi saranno utilizzati in posa direttamente interrata per il vettoriamento dell’energia prodotta dal parco eolico dalle cabine di raccolta verso la SSEU adiacente alla SE di nuova realizzazione di Terna (vedi *ELB.PE.01f - Tracciato elettrodotti (interno) MT su CTR e sezioni tipiche di scavo*, *ELB.PE.01g - SSE Utente-Pianta, sezioni* e *ELB.PE.01h - 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 1,5 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.01i - 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 tali attraversamenti è stata eseguita la verifica delle emissioni elettromagnetiche, i cui risultati sono indicati nella Tavola *ELB.PE.01m - Tavola campi elettromagnetici*.

Per il dettaglio dei tipologici di posa, si rimanda all'elaborato *ELB.PE.01f - 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.01a - 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 *ELB.PE.01a - Schema unifilare*).

Partenza linea	Arrivo linea	tipo di cavo	Formazione
Quadro MT SSEU	Cabina Gruppo SE-01	ARG7H1R unipolare	2x3x(1x630) mm ²
Cabina Gruppo SE-01	Aerogeneratore SE-07	ARG7H1RX tripolare elicordato	1x(3x150) mm ²
Cabina Gruppo SE-01	Aerogeneratore SE-05	ARG7H1RX tripolare elicordato	1x(3x120) mm ²
Cabina Gruppo SE-01	Aerogeneratore SE-02	ARG7H1RX tripolare elicordato	1x(3x95) mm ²
Cabina Gruppo SE-01	Aerogeneratore SE-01	ARG7H1RX tripolare elicordato	1x(3x95) mm ²
Quadro MT SSEU	Cabina Gruppo SE-03	ARG7H1R unipolare	3x3x(1x300) mm ²
Cabina Gruppo SE-03	Aerogeneratore SE-09	ARG7H1RX tripolare elicordato	1x(3x120) mm ²
Cabina Gruppo SE-03	Aerogeneratore SE-04	ARG7H1RX tripolare elicordato	1x(3x95) mm ²
Cabina Gruppo SE-03	Aerogeneratore SE-03	ARG7H1RX tripolare elicordato	1x(3x95) mm ²
Quadro MT SSEU	Cabina Gruppo SE-06	ARG7H1R unipolare	3x3x(1x300) mm ²
Cabina Gruppo SE-06	Aerogeneratore SE-10	ARG7H1RX tripolare elicordato	1x(3x95) mm ²
Cabina Gruppo SE-06	Aerogeneratore SE-08	ARG7H1RX tripolare elicordato	1x(3x95) mm ²
Cabina Gruppo SE-06	Aerogeneratore SE-06	ARG7H1RX tripolare elicordato	1x(3x95) mm ²
Quadro MT SSEU	Aerogeneratore SE-11	ARG7H1RX tripolare elicordato	1x(3x95) mm ²
Quadro MT SSEU	Aerogeneratore SE-12	ARG7H1RX tripolare elicordato	1x(3x95) mm ²

3.2. Aerogeneratori

Sono previsti n. 12 aerogeneratori con le seguenti caratteristiche:

Rotore:

Tipo	Asse orizzontale a 3 pale
Posizione	Sopravento
Diametro	163 m
Superficie spazzata	20867 m ²
Regolazione della Potenza	Regolazione del passo e della coppia con velocità variabile
Inclinazione del rotore	5 gradi

Pala:

Tipo	Autoportante
Lunghezza della lama	79,7 m
Materiale	G (fibra di vetro) - CRP (plastica rinforzata con carbonio)

Generatore:

Tipo.	Asincrono, DFIG
Potenza nominale di base	4,75 MW
Tensione nominale	750 V
Frequenza	50 Hz

Sistema di imbardata:

Tipo	Attivo
Cuscinetto d'imbardata	A quattro punti di contatto a doppia corona
Trasmissione di imbardata	Motoriduttori elettrici
Freno di imbardata	A molla

Sistema di controllo:

Tipo	Sistema di controllo integrato (ICS)
------	--------------------------------------

Freno meccanico:

Tipo	Freno a disco idraulico
Posizione Gearbox	Posteriore

Torre:

Tipo	Tubolare in acciaio
Altezza al mozzo	118 m

Dati operativi

Velocità del vento di Cut-in	3 m/s
Velocità nominale del vento	12,5 m/s
Velocità del vento Cut-out	26 m/s

In ogni aerogeneratore sono contenute le seguenti apparecchiature elettriche:

- Un **alternatore asincrono da 4,75 MW** nominali posto nella navicella a 118 metri di altezza;
- Un **trasformatore BT/MT 0,75/30 kV da 6350 kVA** posto anch'esso nella navicella;
- Un quadro MT dislocato alla base della torre;
- Quadro BT di potenza dislocato nella navicella;

Quadro BT ausiliari alla base della torre

Le caratteristiche elettriche dell'alternatore sono:

Parametri nominali e di interfacciamento alla rete:

Potenza nominale.	4750 kW
Tensione nominale.	750V
Correzione del fattore di potenza	Controllato da inverter
Gamma del fattore di potenza	da 0,9 capacitivo a 0,9 induttivo a potenza nominale

Generatore:

Tipo	Asincrono a doppia alimentazione (DFIG)
Potenza massima	5700 kW
Velocità nominale	650÷1500 giri/min-6p (50Hz)

Raffreddamento:

Sistema di raffreddamento	Raffreddamento acqua/aria
Ventilazione interna	Aria
Parametri di controllo	Temperature di avvolgimento e dei cuscinetti.

Protezione del circuito principale:

Protezione da corto circuito	Interruttore automatico
Ulteriori protezioni	Scaricatore di sovratensione

Consumo di energia da rete (stimato):

Nominale	15 kW
Massimo	25 kW

Alimentazione del sistema di controllo:

Sistema di alimentazione	UPS online, batteria Li-Ion
Tempo di back-up	30 min (all'80% della potenza nominale)

Specifiche di messa a terra

Sistema di messa a terra	Secondo IEC62305-3 ED 1.0:2010
Ferri di armatura della fondazione	Devono essere collegati al dispersore

Le caratteristiche elettriche del trasformatore sono:

Parametri elettrici:

Potenza nominale	6350 kVA
Tipo	In resina
Corrente massima	$\leq 5.5 \times I_N$
Tensione nominale	30/0, 75 kV
Frequenza	50 Hz
Tensione di cortocircuito	8 to 9 % \pm 10 %
Perdite (P ₀ /P _k 75°C)	2,9/70,0 kW
Gruppo vettoriale	Dy5
Standard	IEC 60076 - Direttiva ECO Design

Raffreddamento:

Liquido refrigerante	Refrigerante a base di acqua/glicole
Circuito di raffreddamento	Ad estere con scambiatore estere/acqua

Sistema di messa a terra del neutro:

Centro stella	IT
---------------	----

3.3. Cabina Master

L'impianto eolico di cui trattasi è stato suddiviso in 3 gruppi, oltre a due aerogeneratori connessi direttamente alla SSEU. Ciascun gruppo fa capo ad una cabina denominata Master che contiene interruttori MT a 30 kV in numero pari agli aerogeneratori che appartengono al gruppo specifico. Sarà presente inoltre 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). Sono presenti in impianto 3 cabine Master. La situazione più gravosa, che è stata presa in esame nella presente trattazione, è quella della cabina Master del Grippo SE-01 che presenta 4 linee in ingresso ciascuna con corrente nominale di **91,4 A**. Sull'interruttore generale avremo una intensità di corrente pari a **365,7 A**.

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 posta all'interno dell'area della step-up stessa. Successivamente l'energia collettata viene innalzata al livello di tensione della RTN 150kV tramite un trasformatore 150/30 kV della potenza di 45-63 MVA (ONAN-ONAF). 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 disposizione in pianta delle strutture sopra descritte è riportata nei documenti di progetto *ELB.PE.01g - SSE Utente-Pianta, sezioni* e *ELB.PE.01h - SSE Utente inquadramento su CTR, catastale e ortofoto*.

La porzione di impianto AT di utente sarà così composta:

- Apparati sezione utente
 - n. 3 TA induttivi lato MT (misure)
 - n. 1 trasformatore AT/MT 150/30 kV della potenza di 45 MVA in ONAN e 63 MVA in ONAF;
 - n. 3 scaricatore di sovratensioni;
 - n. 3 TA induttivi lato AT (protezioni);
 - n. 3 interruttore di protezione;
 - n. 3 TV induttivi (misure);
 - n. 3 TV capacitivi (protezioni);
 - n. 3 sezionatore di linea;
 - n. 1 sistema di distribuzione in corda e sbarre di alluminio;
- Apparati montante generale
 - n. 1 interruttore di protezione generale (DG) che svolge anche la funzione di dispositivo di interfaccia (DDI);
 - n. 3 TA induttivi lato AT (protezioni)
 - n. 3 TV capacitivi (protezioni);

- n. 3 sezionatore di linea;
- n. 1 sistema di distribuzione in corda e sbarre di alluminio;

L'impianto sarà completato dalla sezione MT/BT, posta all'interno della cabina MT, la quale sarà composta da:

- n. 1 quadro MT generale 30kV completo di:
 - Scomparti di sezionamento linee di campo
 - Scomparti misure
 - Scomparti protezione generale
 - Scomparto trafo ausiliari
- Trasformatore MT/BT servizi ausiliari 30/0,4 kV da 100 kVA;
- Quadro servizi ausiliari;
- Misuratori fiscali;
- Sistema di monitoraggio e controllo;
- Impianto TVCC;

L'edificio ospitante la cabina MT, come già detto in precedenza, è contenuto all'interno dei confini della cabina MT/AT ed è anch'esso di nuova edificazione.

La massima corrente presente sul lato MT della SSEU è pari a 1096,8 A. Sulle sbarre AT del montante generale la corrente massima è di 219,4 A.

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 μ T (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 μ T intendersi come mediana dei valori 4 ore nelle normali condizioni

<p>Obiettivo di qualità</p> <p>(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)</p>	<p>3 μT</p> <p>(da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio)</p>
---	---

Poiché nel presente progetto sono presenti solo impianti di nuova costruzione, il valore limite di riferimento per l'induzione magnetica è pari a **3 μ T**. L'obiettivo della presente trattazione è quello di determinare, per ogni componente di impianto in grado di generare campi magnetici apprezzabili, la distanza, valutata dai confini del componente di impianto stesso, oltre la quale il valore della induzione magnetica è:

$$B < 3 \mu T$$

Tale distanza si definisce Distanza di Prima Approssimazione (DPA).

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.

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 5kV/m non si raggiunge con le tensioni in gioco.

5. CAMPO MAGNETICO GENERATO DAGLI ELETTRODOTTI

Quella che viene presentata in questo paragrafo è una valutazione analitica del campo magnetico generato dagli elettrodotti, 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 Guida CEI 106-11 (Guida per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti secondo le disposizioni del DPCM 8 luglio 2003 (Art. 6)). La Guida CEI fornisce la metodologia operativa per l'utilizzo degli algoritmi normalizzati definiti nella Norma CEI 211-4.

Per la valutazione del campo magnetico generato dall'elettrodotto occorre innanzitutto distinguere gli elettrodotti in funzione della tipologia dei cavi utilizzati.

Sotto questo aspetto il progetto prevede l'utilizzo di due tipologie:

- cavi in alluminio schermati tripolari a elica visibile posati direttamente interrati;
- cavi in alluminio schermati unipolari disposti in piano e posati direttamente interrati.

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

Tipo di cavo	ARG7H1RX-30 kV tripolare cordato ad elica visibile	ARG7H1R-30 kV unipolare
Sezione (mm²)	95 - 150	300 - 630
Tipo posa	Direttamente interrato	Direttamente interrato disposto in piano
Profondità posa media (m)	1,10	1,50

5.1. Elettrodotti con cavo ARG7H1RX-30 kV tripolare cordato 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 le 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 distanze previste dal Decreto interministeriale n. 449/88 e dal decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 16 gennaio 1991”.

Per quanto sopra non è necessario alcuno studio circa i campi magnetici generati dai cavi cordati ad elica. **Per questi elettrodotti è sufficiente quindi una semplice analisi qualitativa per affermare che l'induzione magnetica è sempre inferiore ai valori limite richiesti dalla normativa e dalle leggi vigenti.**

5.2. Elettrodotti con cavo ARG7H1R-30 kV unipolare

Per questi elettrodotti è necessario determinare la DPA secondo le modalità descritte in precedenza, non essendo tale distanza definita a priori come per gli elettrodotti trattati nel precedente paragrafo.

L'analisi è stata condotta per tutte le combinazioni di posa presenti in impianto che sono riportate nel documento di progetto *ELB.PE.01f - Tracciato elettrodotti (interno) MT su CTR e sezioni tipiche di scavo* e replicate nella tavola *ELB.PE.01m - Tavola campi elettromagnetici* dedicata agli effetti elettromagnetici.

L'analisi del campo magnetico generato dalle linee MT interrato, 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 nel documento *ELB.PE.01m - Tavola campi elettromagnetici*. Da tale documento si ricava che, per i cavidotti in questione, induzione magnetica **B < 3 μT** già all'interno dello scavo.

6. CAMPO MAGNETICO GENERATO DAGLI AEROGENERATORI

Anche l'analisi del campo magnetico generato dagli aerogeneratori è stata condotta utilizzando il software Beshielding descritto nel precedente paragrafo e quindi secondo le 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 118 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 750V) e gli effetti dei campi magnetici prodotti non possono essere compensate con la trasposizione delle fasi. Il risultato ottenuto è rappresentato nei grafici del documento di progetto *ELB.PE.01m - Tavola campi elettromagnetici*. Essi mostrano che, all'esterno di ciascun aerogeneratore, la distanza oltre la quale il valore dell'induzione magnetica **B < 3 μT** è sempre inferiore a **12 metri** sia in orizzontale sia in verticale. Si assume pertanto, per tutti gli aerogeneratori, una **DPA = 12 m sia in orizzontale sia in verticale a partire dalle pareti dell'aerogeneratore stesso.**

7. CAMPO MAGNETICO GENERATO DALLE CABINE DI RACCOLTA (CABINE MASTER)

Le cabine di raccolta sono una potenziale fonte di campi magnetici per l'entità delle correnti in ingresso ed in uscita dalle stesse. Ai fini della valutazione è stata presa come riferimento la cabina master del gruppo SE-01, che è interessata da correnti maggiori rispetto alle altre due. In particolare sono state considerate le correnti che interessano i 5 interruttori MT 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:

- 4 correnti in ingresso, ciascuna pari a 91,4A, corrispondenti ai 4 aerogeneratori connessi;
- 1 corrente in uscita, pari a 365,7A, corrispondenti alla somma delle correnti convogliate verso la SSEU.

Il risultato ottenuto è rappresentato nei grafici del documento di progetto *ELB.PE.01m - Tavola campi elettromagnetici*. Essi mostrano che, all'esterno della cabina presa in esame, la distanza oltre la quale il valore dell'induzione magnetica $B < 3 \mu\text{T}$ risulta di 2,4 m in orizzontale e di 1,34 in verticale. Per la DPA si assumerà un valore di 2,5 m in orizzontale e 1,5 m in verticale.

8. CAMPO MAGNETICO GENERATO DALLA CABINA MT/AT UTENTE (SSEU)

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;

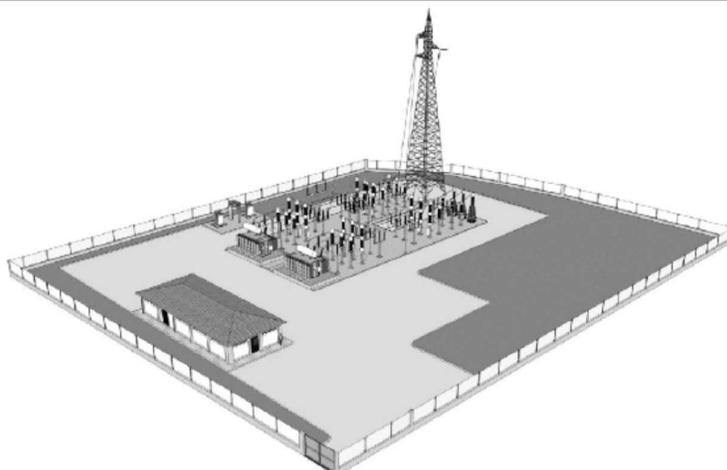
Le altre possibili sorgenti di onde elettromagnetiche di minore rilevanza (linee BT, trasformatori MT/BT, trasformatore MT/AT, quadri MT, quadri BT, apparecchiature BT), sono state giudicate non significative ai fini della presente valutazione, come peraltro riscontrato anche nella letteratura di settore. 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.

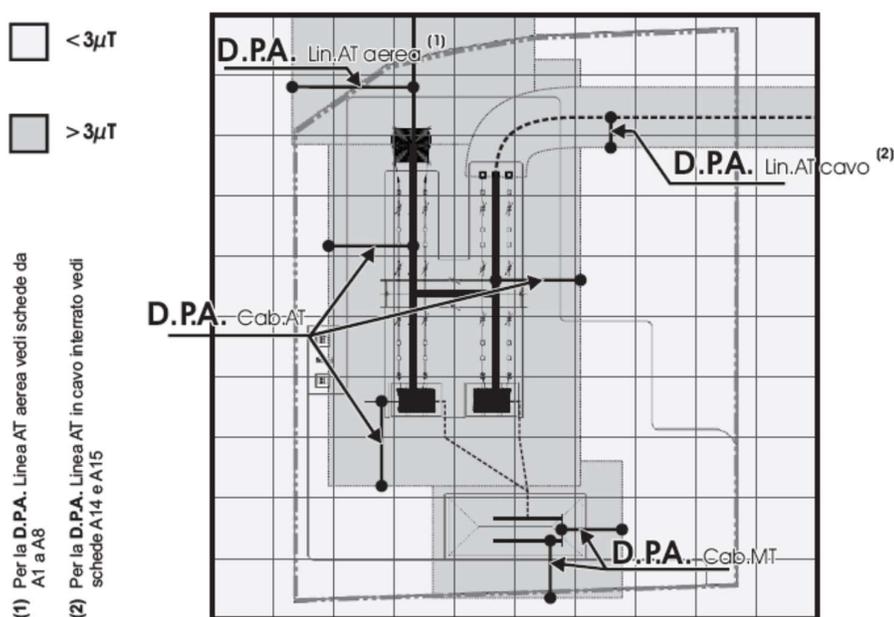
Dallo schema si ricava, per sistemi con caratteristiche analoghe a quelle della sottostazione in oggetto, che le DPA risultano essere:

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

A16 - Cabina primaria isolata in aria (132/150-15/20 kV)



RAPPRESENTAZIONE DELLA FASCIA DI RISPETTO E DELLA D.P.A.



Tipologia trasformatore [MVA]	CABINA PRIMARIA						
	D.P.A. Cab. da centro sbarre AT	Distanza tra le fasi AT	Corrente	D.P.A. Cab. da centro sbarre MT	Distanza tra le fasi MT	Corrente	Riferimento
	m	m	A	m	m	A	
63	14	2.20	870	7	0.38	2332	A16

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 **219,4 A**.

- La massima corrente sulle sbarre MT a 30 kV è pari a **1096,8 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.

Per ricavare valori più attinenti al caso in questione, anche l'analisi del campo magnetico generato dalla SSEU, è stata condotta con un software specifico che utilizza le metodologie di calcolo della Norma 211-4.

Dai grafici riportati nel documento di progetto *ELB.PE.01m - Tavola campi elettromagnetici*, si ricava che le curve isovalore a **3 μ T** dell'induzione magnetica sono sempre contenute entro una distanza dalle sbarre AT tale da rimanere nei confini della SSEU stessa e, in ogni caso, minori di quelle previste dalle linee guida di e-distribuzione. I cavi MT interrati saranno disposti ad elica in maniera tale da non produrre effetti elettromagnetici superiori a quelli delle sbarre AT.

9. 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:

9.1. Elettrodotti MT

Per tutti i cavidotti MT, siano essi costituiti da cavi tripolari ad elica visibile o da cavi unipolari, i campi elettromagnetici sono trascurabili all'esterno dello scavo. Per tale motivo non è necessaria l'apposizione di alcuna fascia di rispetto. Le risultanze grafiche dei calcoli effettuati sono riportate nel documento di progetto *ELB.PE.01m - Tavola campi elettromagnetici*.

9.2. Aerogeneratore

Per il suddetto componente è stata ricavata, mediante l'utilizzo di software specifico una **DPA = 12 m** sia in orizzontale sia in verticale a partire dalle pareti della navicella. Trovandosi la navicella stessa ad una altezza di 118 metri dal piano di campagna, le aree di rispetto individuate (aree con $B > 3 \mu$ T), non interessano zone di territorio frequentate da persone.

Per la rappresentazione grafica, fare riferimento alla tavola *ELB.PE.01m - Tavola campi elettromagnetici*.

9.3. Cabina Master

Per la fonte di emissione in questione è stata ricavata, mediante l'utilizzo di software specifico, una **DPA = 2,4 m** in orizzontale e una **DPA = 1,34** in verticale. Per la **DPA si assumerà un valore di 2,5 m in orizzontale e 1,5 m in verticale**.

9.4. Stazione MT/AT utente (SSEU).

I campi elettromagnetici risultano più intensi in prossimità delle apparecchiature AT, ma trascurabili all'esterno dell'area della sottostazione. È stata individuata la fascia di rispetto di **7,5 m** dalle sbarre AT in senso lungo l'asse X di riferimento e di **8,1 m** lungo l'asse Y. In ogni caso tali fasce di rispetto ricadono nelle aree di pertinenza della SSEU. La linea AT a 150 kV che collega la SSE Utente alla limitrofa SE Terna di nuova realizzazione genera inevitabilmente un campo magnetico all'esterno della SSEU, ma questo rimane comunque confinato all'interno della SE Terna.

La cabina di arrivo cavi MT ha le curve isovalore che risultano avere una distanza dal perimetro della cabina di

2,97 m, per la DPA si assumerà il valore di 3 m.

Per la rappresentazione grafica, fare riferimento alla tavola *ELB.PE.01m - Tavola campi elettromagnetici*.

A conclusione del presente studio, è possibile affermare che, per tutte le sorgenti di campi elettromagnetici individuate, le aree soggette alla "Distanza di prima approssimazione dalle linee elettriche (DPA ai sensi del DM del 29/05/2008)" sono confinate all'interno del perimetro degli impianti di pertinenza del proponente e risultano avere una destinazione d'uso compatibile con quanto richiesto nel DPCM 8 luglio 2003, nonché un tempo di permanenza delle persone (popolazione) all'interno delle stesse non superiore alle 4 ore continuative giornaliere. Si rammenta inoltre che all'interno dell'area di pertinenza degli impianti di competenza del proponente e della SE Terna, il DPCM non si applica essendo espressamente finalizzato alla tutela della popolazione e non ai soggetti esposti al campo magnetico per ragioni professionali.

10.DOCUMENTO DI VALIDAZIONE SOFTWARE DI CALCOLO.



Documento di Validazione

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

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

Sommario

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



1. Premessa

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

Il confronto si sviluppa in tre parti:

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

Le principali caratteristiche del software MAGIC® sono:

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

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

2. Verifica del modulo bidimensionale

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

2.1. Confronto con CEI 211-04

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

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

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

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

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

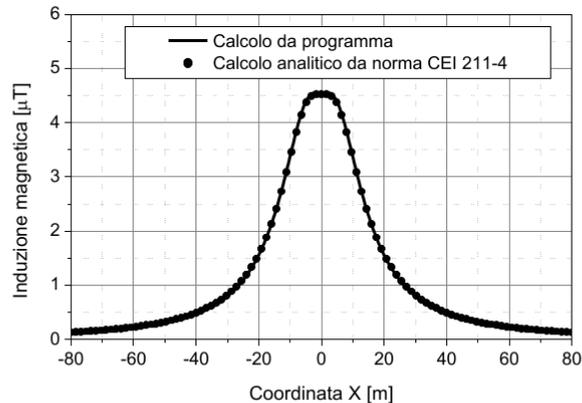


Figure 1 Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

2.2. Confronto con codice CESI

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

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

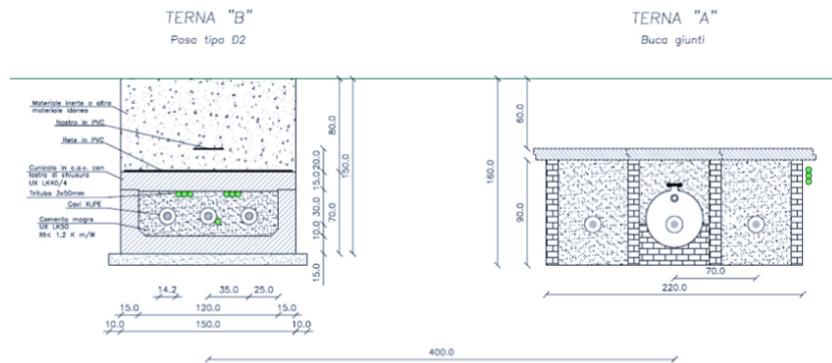


Figure 2 Affiancamento tra due linee interrate AT

Condizioni di carico e relazioni di fase:

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

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

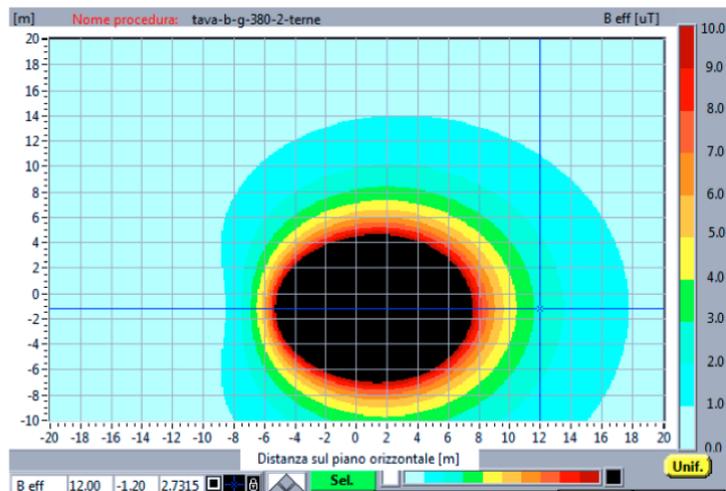


Figure 3 Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

La stessa configurazione è stata analizzata mediante il codice MAGIC® e può essere studiata attraverso due possibili funzioni messe a disposizione dal software:

- Terne parallele
- Multiconduttori 2D

In questo documento verrà utilizzato il Multiconduttore 2D (Fig. 4) che permette di definire un sistema di N conduttori posizionati arbitrariamente in cui viene applicata una corrente arbitraria.

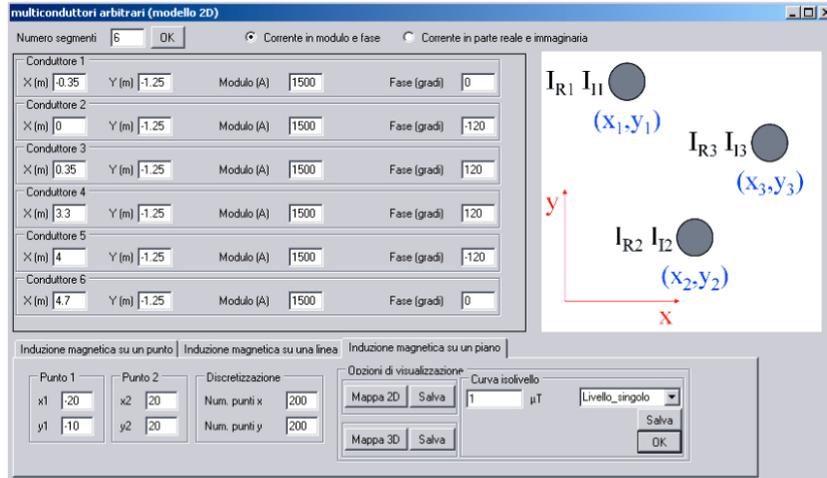


Figure 4 Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)”: dati definizione geometria e sorgenti

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

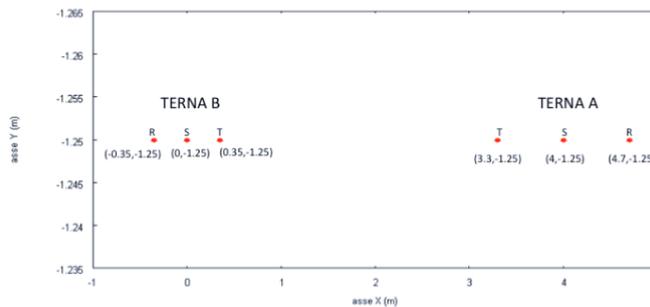


Figure 5 Geometria sorgenti

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

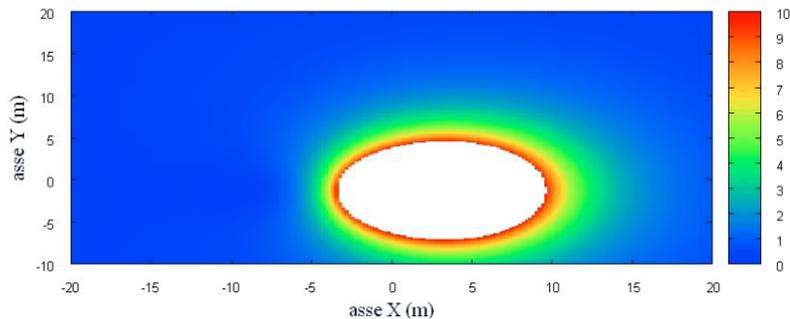


Figure 6 Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

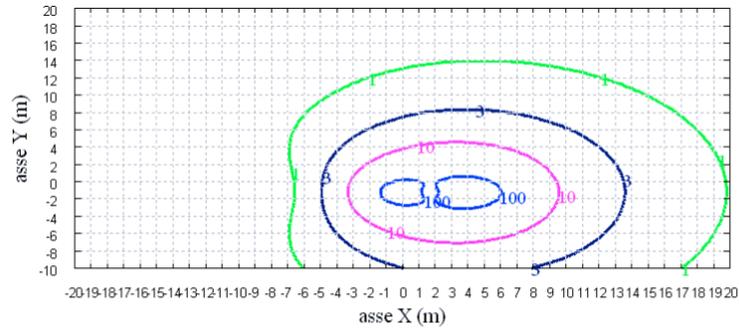


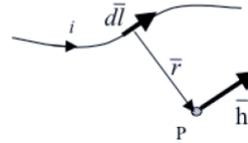
Figure 7 Linee isolivello dell'induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®

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

3. Verifica del modulo tridimensionale

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

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



Nelle configurazioni impiantistiche si ha spesso a che fare con fasci di cavi che il cui profilo copre percorsi approssimabili con buona precisione a delle spezzate tridimensionali. Ogni spezzata è quindi modellabile mediante una successione di segmenti opportunamente orientati nello spazio. Ne consegue che, sapendo valutare il campo di un segmento arbitrariamente orientato nello spazio, è possibile calcolare il campo prodotto da un fascio di cavi mediante la sovrapposizione degli effetti di tutti i segmenti costituenti il fascio.

3.1. Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato

Si consideri il segmento rappresentato nella Fig. 8.

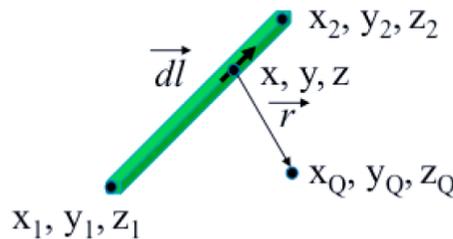


Figure 8 Modello del segmento.

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

$$\begin{cases} x = x_1 + (x_2 - x_1)t \\ y = y_1 + (y_2 - y_1)t \\ z = z_1 + (z_2 - z_1)t \end{cases}$$

Si consideri inoltre che:

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

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

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

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

3.2. Validazione sperimentale del modulo tridimensionale

In Fig. 9 viene rappresentata una spira costituita da 4 conduttori rettilinei che ben rappresenta una sorgente di tipo tridimensionale.

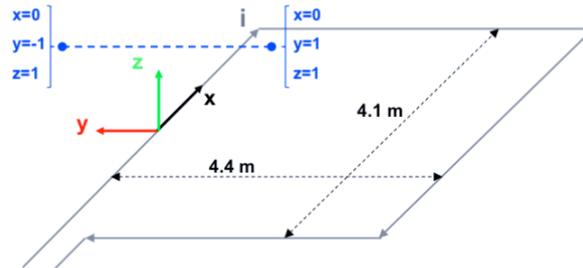


Figure 9 Schema di spira quadrata.

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

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

Su tale linea di confronto sono state eseguite delle misure sperimentali mediante sistema composto da sonda PMM-EHP50 C le cui caratteristiche sono riportate nel seguente elenco:

- Range di frequenze 5Hz – 100 kHz
- Range di campo elettrico 0.01 V/m – 100 kV/m
- Range di campo magnetico 1 nT – 10 mT
- Risoluzione 0.01 V/m - 1 nT
- Tempo di campionamento 30, 60 sec
- Massima acquisizione 1600 ore con acquisizione ogni 60 sec.
- SPAN 100, 200,500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 10 kHz, 100 kHz

Viene infine eseguito il confronto tra misure sperimentali e calcolo eseguito mediante software MAGIC®. I risultati di confronto sono riassunti nella seguente figura.

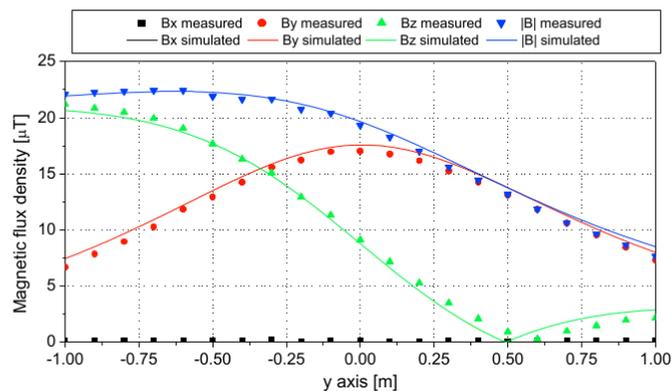


Figure 10 Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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

4. Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza

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

La validazione è condotta in due step:

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

Maggiore dettaglio sui confronti sono riportati nella seguente referenza:

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

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

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

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

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

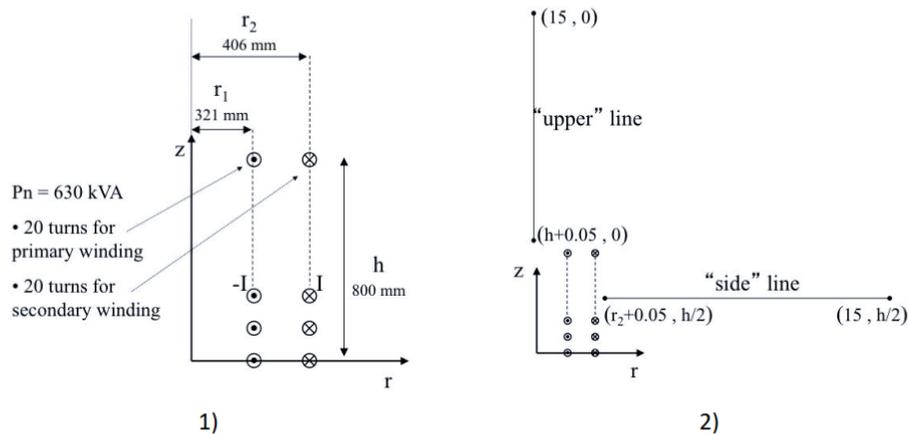


Figure 11 Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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



BESHIELDING

Si può osservare un ottimo accordo tra i “modelli 1 e 2” adottati nel MAGIC® lungo entrambe le linee mentre per distanze inferiori al metro il modello semplificato, con particolare riferimento al campo lungo la linea verticale, risulta portare a delle discrepanze significative. Per tali distanze è pertanto conveniente utilizzare il “modello 2” che risulta più accurato a spese di un maggiore peso computazionale (nell’ordine comunque delle decine di secondi).

I modelli inseriti nel MAGIC® sono inoltre confrontati con il modello proposto da un altro software commerciale (EFC-400) che verrà denominato “Modello 3”. Tale modello è basato sull’ipotesi che il campo magnetico disperso, essendo correlato con la reattanza di dispersione del trasformatore, risulta quantitativamente correlato alla tensione di corto circuito. Il modello proposto da EFC-400 è quindi costituito da un unico avvolgimento (che sintetizza il primario ed il secondario) percorso da una corrente ridotta, rispetto alla corrente nominale, secondo la seguente formula:

$$I = I_R \cdot \frac{V_{SC}\%}{100}$$

in cui I_R è la corrente nominale (di primario o secondario) e V_{SC} è la tensione di cortocircuito percentuale. Può essere utilizzata la corrente di primario o di secondario (I_{R1} o I_{R2}) e corrispondentemente occorre considerare le spire di primario o secondario (N_1 e N_2).

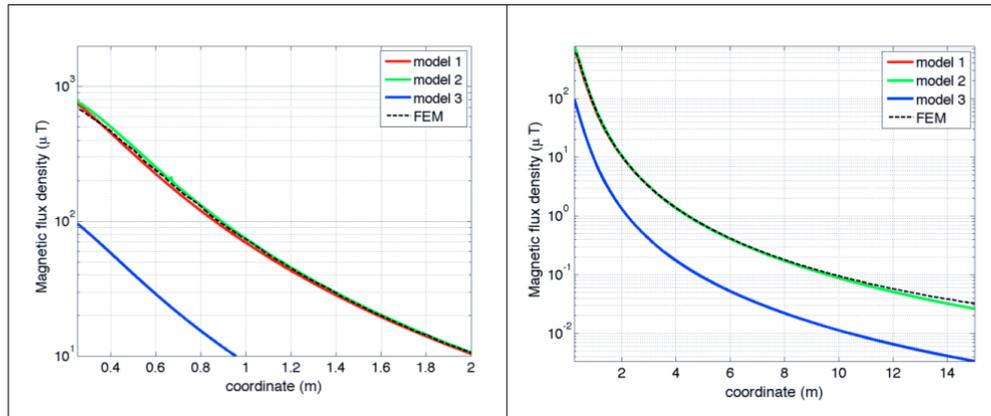


Figure 12 Induzione magnetica lungo la linea laterale

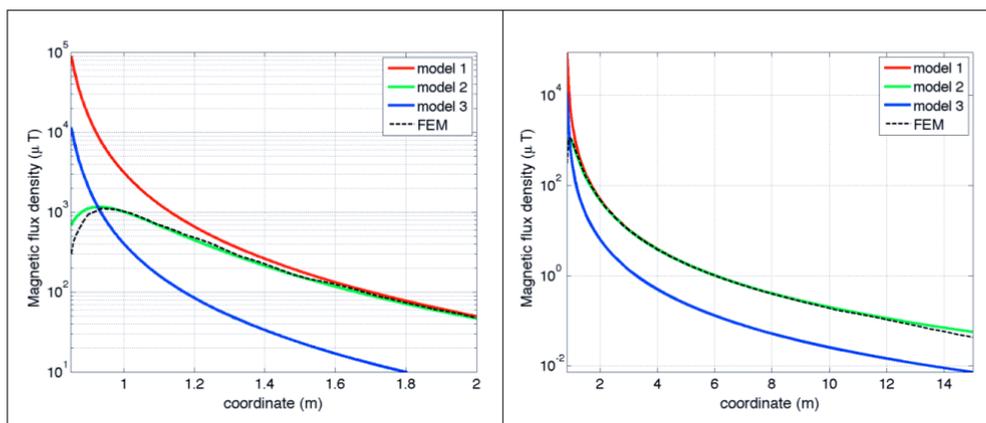


Figure 13 Induzione magnetica lungo la linea superiore

Come si può osservare dai profili di induzione magnetica il modello 3 risulta scarsamente idoneo a modellare i due avvolgimenti concentrici di primario e secondario.

4.2. Verifica del modello MAGIC® del trasformatore completo con misure sperimentali

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

Le linee di calcolo S1 ed S2 (Fig. 15) sono poste ad 1.5m dal piano di appoggio del trasformatore. E' importante sottolineare che il contributo dei terminali di BT influisce significativamente sul campo magnetico ambientale, specialmente nella direzione S1. Pertanto, l'introduzione di tali sorgenti addizionali agli avvolgimenti porta ad una riduzione degli scostamenti tra i vari modelli.

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

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

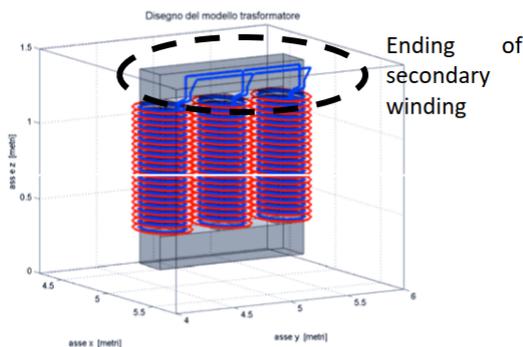


Figure 14 Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

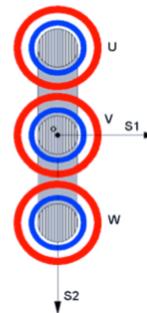


Figure 15 Linee di calcolo S1 ed S2

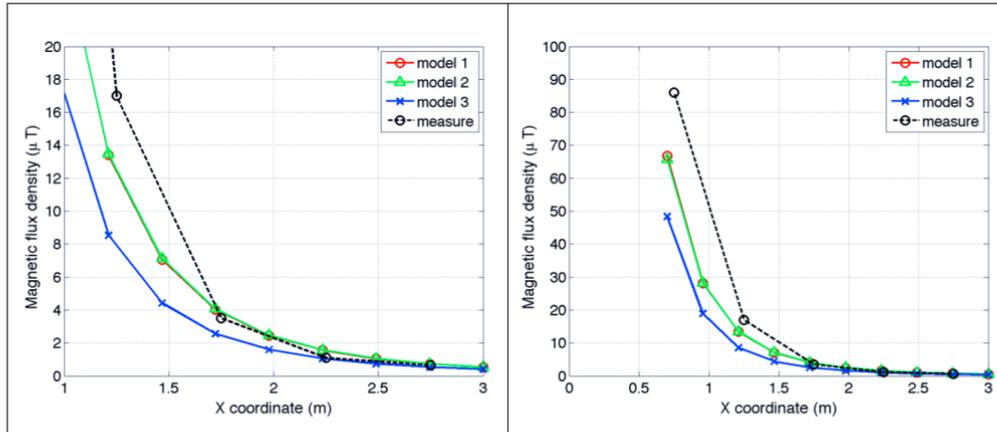


Figure 16 Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

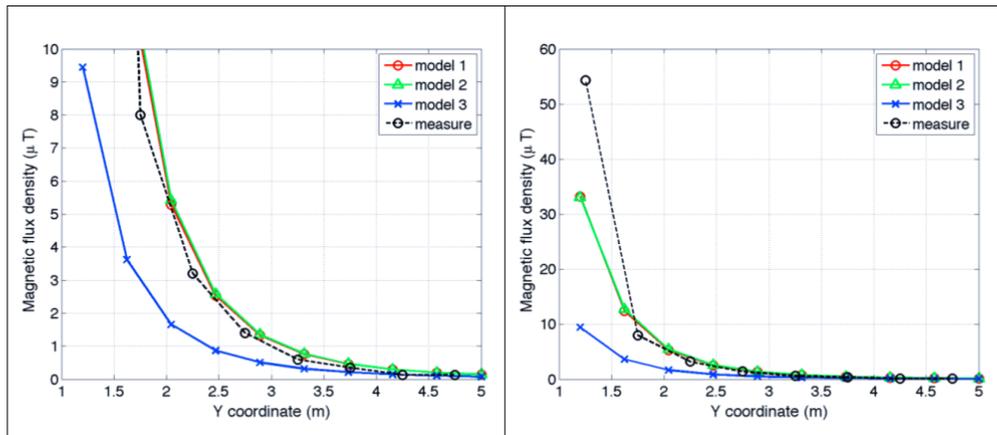


Figure 17 Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

5. Conclusioni

Il presente documento si propone di fornire alle autorità competenti tutti gli elementi necessari affinché il software MAGIC® possa essere validato secondo quanto richiesto dal Decreto Ministeriale (160) del 29/05/2008 “Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti”.

Come indicato nell’art. 5.1.2 (Calcolo delle fasce di rispetto per linee elettriche) del decreto del 29/05/2008, i modelli tridimensionali non sono ancora standardizzati, tuttavia un software in cui i modelli soddisfino ai seguenti requisiti indicati nel decreto:

“...i modelli utilizzati devono essere descritti in termini di algoritmi implementati, condizioni al contorno e approssimazioni attuate. Essi devono essere validati attraverso misure o per confronto con modelli che abbiano subito analogo processo di verifica. La documentazione esplicativa e comprovante i criteri di cui sopra deve essere resa disponibile alle autorità competenti ai fini dei controlli”

può essere ritenuto idoneo allo scopo e, a tal fine, è stato redatto il presente documento.

Per quanto concerne in particolare le cabine elettriche, la complessità delle sorgenti in esame richiede una valutazione accurata che tenga conto principalmente della tridimensionalità delle singole sorgenti e l’effetto prodotto dalla combinazione delle stesse (sovrapposizione degli effetti). Nelle analisi precedentemente svolte sono stati analizzati e validati i principali componenti costituenti le cabine quali linee elettriche di connessione (tratti di conduttori di lunghezza finita), quadri elettrici (tratti conduttori di lunghezza finita) e trasformatori (elementi toroidali e tratti di conduttore di lunghezza finita).

Dai risultati ottenuti e presentati è quindi possibile concludere che il Software MAGIC® ha le caratteristiche per essere rispondente alle indicazioni richieste dal Decreto Ministeriale (160) del 29/05/2008, lasciando ovviamente alle autorità competenti la verifica ed il giudizio finale.