

Badia Tedalda Eolico Srl

| Via Francesco Tamagno, 7 | 20124 Milano (MI) | P.IVA 12334000960 | PEC badiatedaldaeolicosrl@pec.it |

Parco Eolico Poggio Tre Vescovi

Formato: A4

Scala: -

Aprile 2023

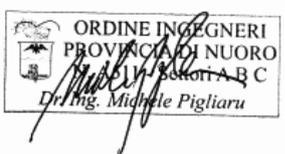
Progettazione specialistica

Ing. Michele Pigliaru
Ord. Ing. NU n. A511

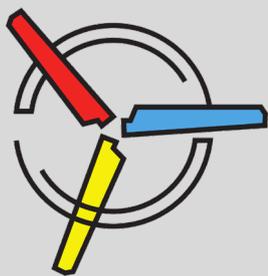
SI.CEM.R.01.a

Studio degli impatti sul patrimonio ambientale, paesaggistico e biotico
Agenti fisici - campi elettromagnetici

RELAZIONE PREVISIONALE DI IMPATTO ELETTROMAGNETICO



Rev.	Data	Oggetto
a	11/04/2023	Prima emissione



Parco eolico Poggio Tre Vescovi

Proponente



Badia Tedalda Eolico Srl
Via Francesco Tamagno, 7 - 20124 Milano (MI)

Referente di progetto

Dott. Roberto Schirru

Coordinamento tecnico



ENVI area stp snc
Ing. Cristina Rabozzi
Dott. Agr. Elena Lanzi
Dott. Agr. Andrea Vatteroni

Progettazione opere civili e cantierizzazione

ENKI

INGEGNERIA

Progettazione opere di utenza per la connessione CP "Badia Tedalda"

Ing. Michele Pigliaru

Geologia e geotecnica

SINERGIA

progettazione e consulenza ambientale srls

Aspetti trasportistici

ENKI srl
Ing. Andrea Mazzetti

Sinergia srls
Dott. Geol. Luca Gardone

SIEMENS Gamesa
RENEWABLE ENERGY

Siemens Gamesa S.A.
Ing. Alessandro Noro

Topografia



Anemometria

SKYWIND

3D Metrica – Ing. Paolo Corradeghini

Skywind GmbH
Ing. Sasha Claes

Studio di impatto ambientale, studio di incidenza ambientale, aspetti socio-economici e antropici



ENVI area stp snc
Ing. Cristina Rabozzi
Dott. Agr. Elena Lanzi
Dott. Agr. Andrea Vatteroni

Paesaggio



INLAND Landscape Architecture – Arch. Andrea Meli

Biodiversità, ecosistemi e reti ecologiche



Dott. For. Ilaria Scatarzi

Dott. Biol. Marco Lucchesi

Dott. Dino Scaravelli

Consorzio Futuro in Ricerca
Dott. Lisa Brancaleoni
(aspetti floristico-vegetazionali)
(aspetti forestali, ecosistemi e reti ecologiche)
(avifauna)
(chiroterofauna)

Archeologia



Cooperativa archeologia s.c.
Dott. Andrea Biondi

Acustica



Tecnocreo srl
Ing. Matteo Bertoneri

CEM

Ing. Michele Pigliaru



SOMMARIO

1.	GENERALITÀ.....	2
1.1	Descrizione del progetto.....	2
1.2	Tipo e ubicazione dell'immobile.....	2
1.3	Caratteristiche generali.....	2
2.	NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	4
3.	FONTI DI EMISSIONE.....	5
3.1	Elettrodotto AT.....	5
3.2	Aerogeneratori.....	6
3.3	Cabina di raccolta.....	9
4.	VALORI LIMITE DI RIFERIMENTO.....	10
4.1	Valori limite del campo magnetico.....	10
4.2	Valori limite del campo elettrico.....	10
5.	CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DAGLI ELETTRODOTTI.....	11
6.	CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DAGLI AEROGENERATORI.....	12
7.	CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DALLA CABINA RACCOLTA.....	14
8.	CONCLUSIONI.....	16
8.1	– Elettrodotti AT 36 kV.....	16
8.2	– Aerogeneratore.....	16
8.3	– Cabina di raccolta 36 kV.....	16
9.	DOCUMENTO DI VALIDAZIONE SOFTWARE DI CALCOLO.....	17



1. GENERALITÀ

1.1 Descrizione del progetto

La presente relazione riguarda la valutazione dei campi elettromagnetici (radiazioni non ionizzanti) relativi all'impianto elettrico interno, dal sito di produzione fino al punto di consegna dell'energia, di un parco eolico costituito da n. 11 aerogeneratori da 6,6 MW ciascuno, per una potenza totale di 72,6 MW. Il parco eolico è denominato "Poggio Tre Vescovi".

L'impianto sarà del tipo grid-connected e l'energia elettrica prodotta sarà riversata completamente in rete, salvo gli autoconsumi di centrale. La connessione alla rete di trasmissione in Alta Tensione a 36 kV avverrà mediante un nuovo stallo a 36 kV da realizzarsi all'interno di una nuova SE di Terna S.p.A.

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 località "Poggio Tre Vescovi" in agro del Comune di Badia Tedalda (AR).

L'intero parco eolico è situato all'interno del territorio comunale di Badia Tedalda (AR).

La linea elettrica AT a 36 kV interrata, che connette il sito di produzione alla SE di Terna S.p.A., è dislocata interamente nel territorio comunale di Badia Tedalda (AR).

1.3 Caratteristiche generali

L'impianto eolico in esame sarà connesso direttamente alla rete AT a 36 kV previa realizzazione di una nuova SE di Terna S.p.A. che conterrà lo stallo a 36 kV a cui sarà connessa la linea interrata proveniente dal parco eolico in esame.

Si prevede l'installazione di n. **1** aerogeneratori con potenza nominale di **6,6 MW** ciascuno per una potenza nominale totale di **72,6 MW**.

L'impianto è suddiviso in 3 sezioni (sottocampi) secondo il seguente schema:

- Sottocampo 1
 - Aerogeneratore n. AE04
 - Aerogeneratore n. AE03
 - Aerogeneratore n. AE02
 - Aerogeneratore n. AE01
- Sottocampo 2
 - Aerogeneratore n. AE05
 - Aerogeneratore n. AE06
 - Aerogeneratore n. AE07
 - Aerogeneratore n. AE08
- Sottocampo 3
 - Aerogeneratore n. AE09
 - Aerogeneratore n. AE10
 - Aerogeneratore n. AE11

Ai 3 sottocampi corrispondono **3 linee AT a 36 kV in cavo unipolare ARP1H5(AR)E interrato** che collegano l'impianto alla SE di Terna S.p.A. In prossimità dell'aerogeneratore AE04 sarà realizzata una cabina di raccolta che conterrà gli interruttori a 36 kV per la protezione e il sezionamento dei 3 sottocampi oltre all'interruttore generale a 36 kV da cui partirà la linea montante in cavo interrato a 36 kV verso lo stallo a 36 kV della SE Terna.



All'interno di ciascun sottocampo, gli aerogeneratori sono collegati tra loro, con distribuzione radiale, mediante linee **AT a 36 kV in cavo ARE4H5EX 20,8/36KV tripolare elicordato interrato**.

Ciascun aerogeneratore contiene al suo interno:

- Un alternatore asincrono da 6,6 MW nominali posto nella navicella a 102,5 metri di altezza;
- Un trasformatore BT/AT 0,69/36 kV da 7 MVA posto anch'esso nella navicella;
- Un quadro AT dislocato alla base della 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 AT di interconnessione fra gli aerogeneratori;
 - b) elettrodotto AT di vettoriamento dell'energia prodotta dal parco eolico verso la SE di Terna S.p.A.;
- 2) gli aerogeneratori;
- 3) la cabina di raccolta.

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 AT

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

- Cavi tripolari con anime disposte ad elica visibile e conduttori in alluminio. Tali cavi saranno utilizzati in posa direttamente interrata.

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 AT a 36 kV, si prevede la posa direttamente interrata dei cavi ad una profondità di 1,40 m dal piano di calpestio. Nel progetto in esame è stata ipotizzata l'utilizzazione di cavi AT dotati di protezione meccanica in materiale polimerico (Air Bag); questo cavo consente di evitare la posa di una protezione meccanica supplementare (Norma CEI 11-17 art. 4.3.11 lettera b). In fase esecutiva potrà essere comunque utilizzato un cavo senza armatura a patto di inserire, nella sezione di scavo, una protezione meccanica supplementare (Norma CEI 11-17 - posa tipo M).

L'elettrodotto utente a 36 kV sarà interamente interrato. Lungo il percorso dell'elettrodotto sono presenti i seguenti fiumi o corsi d'acqua:

- Fosso delle Borraie;
- Fiume Marecchia;
- Fosso Cardinale
- Fosso della Giustizia
- Fosso della Fonte (in due piunti)
- Fosso Bovigliano

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.

Per il dettaglio dei tipologici di posa, si rimanda all'elaborato PD.OUC.T.02.a - Tracciato elettrodotti su CTR e sezioni tipiche di posa.

La tensione di esercizio dei cavi è pari a 36 kV. Le correnti nominali per ciascuna linea sono funzione della potenza vettoriata.



La tabella che segue riporta le tipologie e le formazioni dei cavi AT utilizzati nelle diverse sezioni di impianto. 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.

Tabella 1. Tipologie e formazioni di cavi AT 36 kV utilizzati

Partenza linea	Arrivo Linea	Tipo di cavo	Formazione
STALLO 36 kV SE TERNA	CABINA DI RACCOLTA	ARE4H5EX 20,8/36KV tripolare elicordato	6x(3x300) mmq
CABINA DI RACCOLTA	AE04	ARE4H5EX 20,8/36KV tripolare elicordato	2x(3x300) mmq
AE04	AE03	ARE4H5EX 20,8/36KV tripolare elicordato	1x(3x120) mmq
AE04	AE02	ARE4H5EX 20,8/36KV tripolare elicordato	1x(3x120) mmq
AE04	AE01	ARE4H5EX 20,8/36KV tripolare elicordato	1x(3x120) mmq
CABINA DI RACCOLTA	AE05	ARE4H5EX 20,8/36KV tripolare elicordato	2x(3x300) mmq
AE05	AE06	ARE4H5EX 20,8/36KV tripolare elicordato	1x(3x120) mmq
AE05	AE07	ARE4H5EX 20,8/36KV tripolare elicordato	1x(3x120) mmq
AE05	AE08	ARE4H5EX 20,8/36KV tripolare elicordato	1x(3x120) mmq
CABINA DI RACCOLTA	AE09	ARE4H5EX 20,8/36KV tripolare elicordato	2x(3x300) mmq
AE09	AE10	ARE4H5EX 20,8/36KV tripolare elicordato	1x(3x120) mmq
AE09	AE11	ARE4H5EX 20,8/36KV tripolare elicordato	1x(3x120) mmq

3.2 Aerogeneratori

Sono previsti n. 14 aerogeneratori con le seguenti caratteristiche:

Rotore:

Tipo Asse orizzontale a 3 pale

Posizione Sopravento

Diametro 155 m

Superficie spazzata 18869 m²

Regolazione della Potenza Regolazione del passo e della coppia con velocità variabile

Inclinazione del rotore 6 gradi

Pala:

Tipo Autoportante

Lunghezza della lama 76 m

Corda massima 4,5 m

Materiale G (fibra di vetro) - CRP (plastica rinforzata con carbonio)

Generatore:

Tipo. Asincrono, DFIG

Potenza nominale di base 6,6 MW

Tensione nominale 690 V

Frequenza 50 Hz

Sistema di imbardata:

Tipo Attivo

Cuscinetto d'imbardata Orientato esternamente

Trasmissione di imbardata Motoriduttori elettrici

Freno di imbardata Freno ad attrito attivo

Sistema di controllo:

Tipo Sistema di controllo integrato (ICS)



Sistema SCADA Sistema SGRE SCADA

Freno aerodinamico:

Tipo Pitching a campata piena

Attivazione Idraulica

Freno meccanico:

Tipo Freno a disco idraulico

Posizione Gearbox Posteriore

Torre:

Tipo Tubolare in acciaio

Altezza al mozzo 102,5 m

Dati operativi

Velocità del vento di Cut-in 3 m/s

Velocità nominale del vento 11,0 m/s (vento costante senza turbolenza, come definito da IEC61400-1)

Velocità del vento Cut-out 25 m/s

In ogni aerogeneratore sono contenute le seguenti apparecchiature elettriche:

- Un alternatore asincrono da 6,6 MW nominali posto nella navicella a 102,5 metri di altezza;
- Un trasformatore BT/AT 0,69/36 kV da 7 MVA posto anch'esso nella navicella;
- Un quadro AT 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. 6600 kW

Tensione nominale. 690V

Correzione del fattore di potenza Controllato da inverter

Gamma del fattore di potenza da 0,9 capacitivo a 0,9 induttivo a tensione nominale bilanciata

Generatore:

Tipo Asincrono a doppia alimentazione

Potenza massima 6760 kW alla temperatura esterna di 30°C

Velocità nominale 1120 giri/min-6p (50Hz)

Protezione:

Classe di isolamento Statore H/H - Rotore H/H

Rilevamento temperature di avvolgimento 6 sensori Pt 100

Rilevamento temperature dei cuscinetti 3 Pt 100

Rilevamento temperature anelli scorrevoli 1 Pt 100

Raffreddamento:

Sistema di raffreddamento Raffreddamento ad aria

Ventilazione interna Aria

Parametri di controllo Temperature di avvolgimento e dei cuscinetti.



Inverter:

Tipo 4Q carico parziale B2B
Commutazione PWM
Frequenza di commutazione lato rete 2,5 kHz
Raffreddamento Liquido / Aria

Protezione del circuito principale:

Protezione da corto circuito Interruttore automatico
Scaricatore di sovratensione varistori

Livelli di potenza di picco:

10 min di media Limitato al nominale

Specifiche di interfacciamento alla rete:

Frequenza nominale della rete 50 Hz
Tensione minima 85 % del nominale
Tensione massima 113 % del nominale
Frequenza minima 92 % del nominale
Frequenza massima 108 % del nominale
Massimo squilibrio di tensione (sequenza negativa della tensione dei componenti) $\leq 5\%$
Livello massimo di cortocircuito ai morsetti della rete del regolatore (690 V) 82 kA

Consumo di energia da rete (stimato):

In stand-by, senza imbardata 10 kW
In stand-by, imbardata 50 kW

Alimentazione del sistema di controllo:

Sistema di alimentazione UPS online, batteria Li-Ion
Tempo di back-up 1 min

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 ai dispersori
Collegamento HV Lo schermo del cavo HV deve essere collegato al sistema di messa a terra

Le caratteristiche elettriche del trasformatore sono:

Parametri elettrici:

Potenza nominale 7MVA
Tipo In olio
Corrente massima 7,23 kA + armoniche alla tensione nominale $\pm 10\%$.
Tensione nominale 30/0,69 kV
Frequenza 50 Hz
Tensione di cortocircuito $6\% \pm 8,3\%$
Perdite (P0 /Pk75°C) 4.77/84.24 kW
Gruppo vettoriale Dyn11
Standard IEC 60076 - Direttiva ECO Design

Sistema di monitoraggio:



Sensore di temperatura massima dell'olio PT100
Sensore di monitoraggio del livello dell'olio Ingresso digitale
Relè di sovrappressione Ingresso digitale

Raffreddamento:

Tipo di raffreddamento... KFAF
Liquido all'interno del trasformatore Liquido di Classe K
Liquido di raffreddamento allo scambiatore di calore Glysantin

Sistema di messa a terra del neutro:

Centro stella il centro stella del trasformatore è collegato a terra

3.3 Cabina di raccolta

La cabina di raccolta, posta in prossimità dell'aerogeneratore AE04, conterrà:

- N. 3 interruttori AT 36 kV che raccolgono le linee provenienti dai 3 sottocampi;
- N. 1 interruttore AT 36 kV da cui partirà la linea montante che collegherà il parco eolico allo stallo a 36 kV posto all'interno della SE Terna.

La massima corrente presente all'interno della cabina di raccolta sarà pari a 1164 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.

Tabella 2. Valori limite del campo magnetico

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

Poiché nel presente progetto sono presenti solo impianti di nuova costruzione, il valore limite di riferimento per l'induzione magnetica è pari a **3 μT** . 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:

$$B < 3 \mu\text{T}$$

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.



5. CAMPO ELETTROMAGNETICO 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 una sola tipologia di cavi:

- cavi in alluminio schermati tripolari a elica visibile posati direttamente interrati;

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

Tabella 3. Tipologie di cavi utilizzati e modalità di posa

Tipo di cavo	ARE4H5EX 20,8/36KV-36 kV tripolare cordato ad elica visibile	ARE4H5EX 20,8/36KV-36 kV tripolare cordato ad elica visibile
Sezione (mm ²)	120	300
Tipo posa	Direttamente interrato	Direttamente interrato
Profondità posa (m)	1,40	1,40

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

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

“sono escluse dall'applicazione della metodologia:

-
- *Le linee in AT 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 di questa tipologia costruttiva. **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.**



6. CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DAGLI AEROGENERATORI

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. In appendice (par 9.3) alla presente relazione è allegato un "Documento di Validazione" fornito dal produttore del software stesso ("Beshielding").

I valori dell'induzione magnetica all'esterno di 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 AT/BT posizionato nella navicella a 102,5 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 690V) e gli effetti dei campi magnetici prodotti non possono essere compensate con la trasposizione delle fasi. Il risultato ottenuto è rappresentato nei grafici allegati al presente documento. Essi mostrano che, all'esterno di ciascun aerogeneratore, la distanza oltre la quale il valore dell'induzione magnetica $B < 3 \mu T$ 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.**

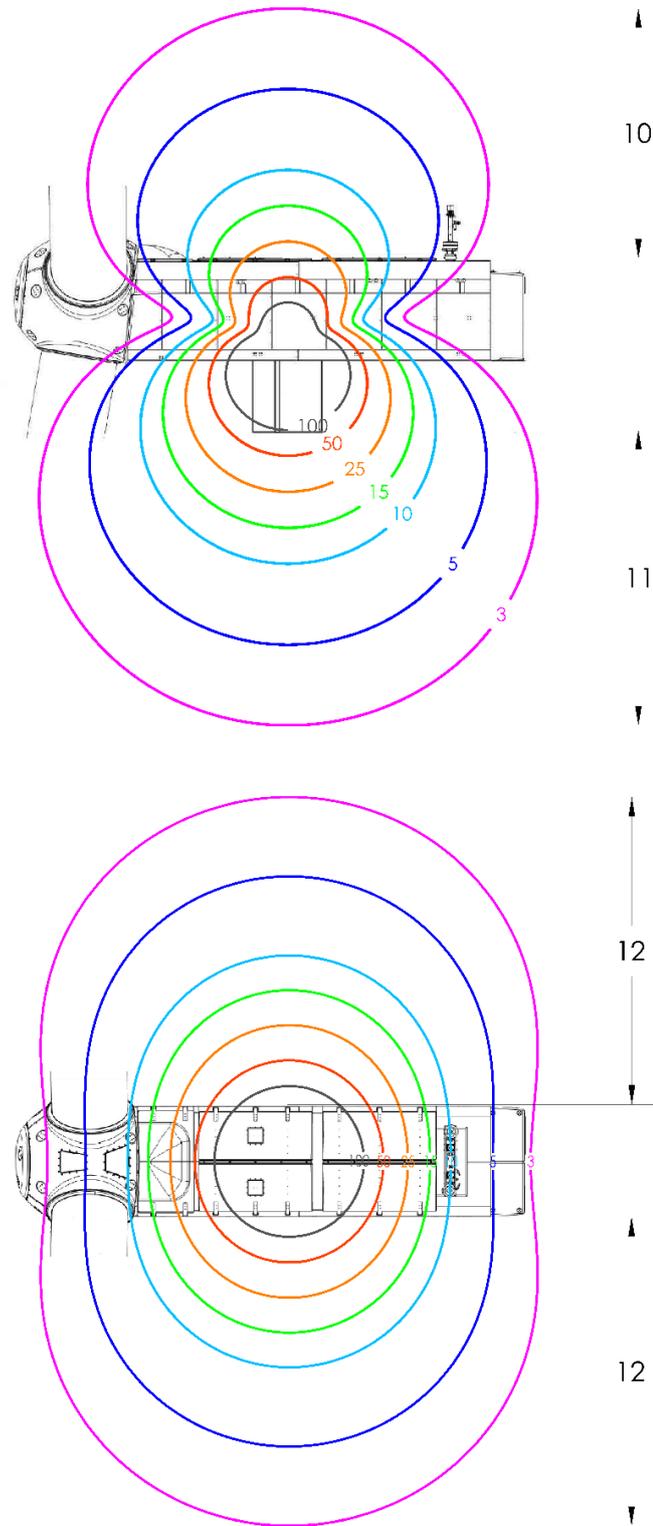


Figura 1. Curve isovalore induzione magnetica generata dall'aerogeneratore



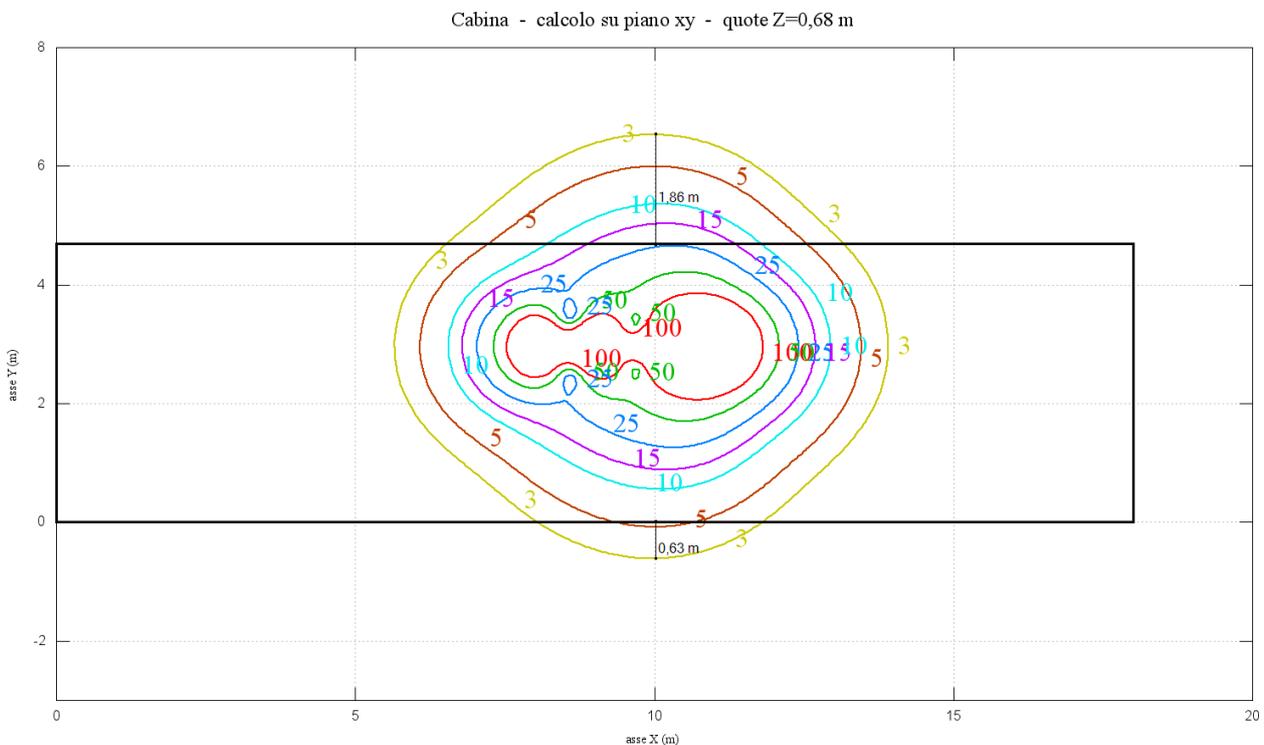
7. CAMPO ELETTRIMAGNETICO GENERATO DALLA CABINA RACCOLTA.

L'analisi del campo magnetico generato dalla cabina di raccolta 36 kV è stata condotta impiegando il software specifico che utilizza le metodologie di calcolo della Norma 211-4. In appendice (par 9.3) alla presente relazione è allegato un "Documento di Validazione" fornito dal produttore del software stesso ("Beshielding").

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

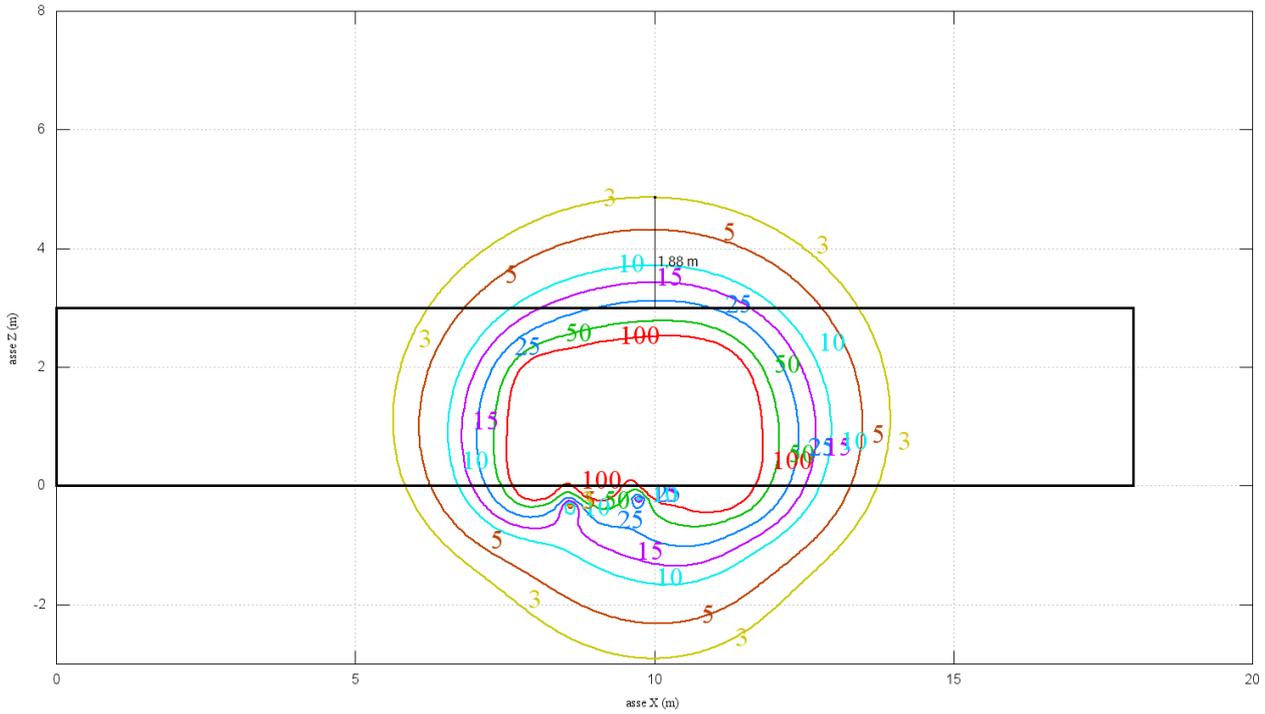
Di seguito sono rappresentate le curve isovalore dell'induzione magnetica nell'intorno della cabina di raccolta.

Figura 2. Curve isovalore induzione magnetica generata dalla cabina di raccolta

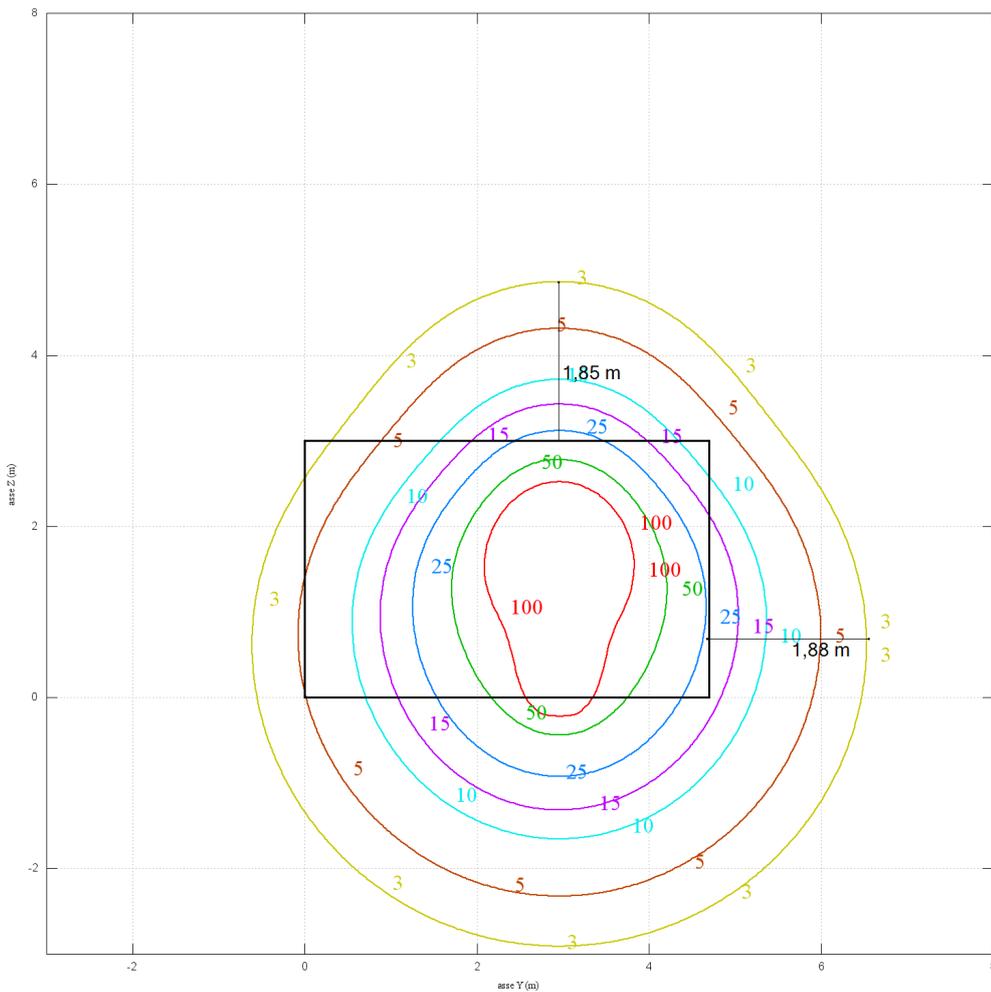




Cabina - calcolo su piano xz - quote Y=3 m



Cabina - calcolo su piano yz - quote X=10 m





8. CONCLUSIONI.

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

Di seguito i principali risultati:

8.1 – Elettrodotti AT 36 kV

Sono presenti solo cavi tripolari ad elica visibile (sezioni 120 e 300 mm²) i cui campi elettromagnetici sono trascurabili. Per essi non è necessaria l'apposizione di alcuna fascia di rispetto.

8.2 – 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 102,5 metri dal piano di campagna, le aree di rispetto individuate (aree con $B > 3 \mu\text{T}$), non interessano zone di territorio frequentate da persone.

8.3 – Cabina di raccolta 36 kV

Per il suddetto componente è stata ricavata, mediante l'utilizzo di software specifico ("Beshielding", in allegato i risultati della simulazione) una **DPA di 0,5 m** sia in orizzontale sia in verticale a partire dalle pareti della cabina di campo stessa. In ogni caso le aree di rispetto individuate (aree con $B > 3 \mu\text{T}$), sono confinate all'interno della recinzione che delimita l'impianto.

Per la rappresentazione grafica, fare riferimento alla tavola PD-Tav12b.

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'aree di pertinenza degli impianti di competenza del proponente, il DPCM non si applica essendo espressamente finalizzato alla tutela della popolazione e non ai soggetti esposti al campo magnetico per ragioni professionali.



9. DOCUMENTO DI VALIDAZIONE SOFTWARE DI CALCOLO.



Documento di Validazione

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

Data:09/01/2020

Rev.02





Sommario

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



Premessa

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

Il confronto si sviluppa in tre parti:

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

Le principali caratteristiche del software MAGIC® sono:

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

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

1 Verifica del modulo bidimensionale

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

1.1 Confronto con CEI 211-04

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

Sotto queste ipotesi l'induzione magnetica \vec{B} è data dall'espressione:

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

in cui N è il numero dei conduttori, d è la distanza tra il conduttore k -esimo e il punto di calcolo; i vettori \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



BESHIELDING

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

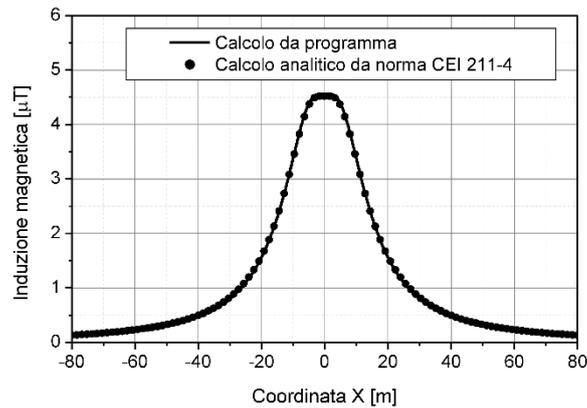


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

1.2 Confronto con codice CESI

L'analisi del campo magnetico prodotto è stata condotta su due terne trifase di cavi affiancati. 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

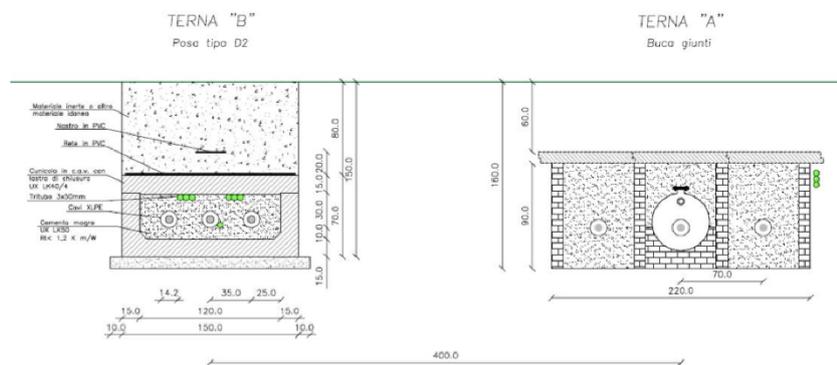


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT



BESHIELDING

Condizioni di carico e relazioni di fase:

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

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

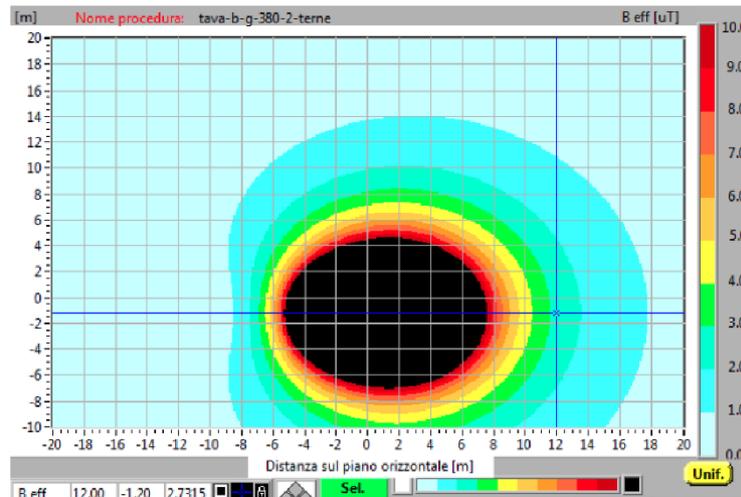


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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

- Terne parallele
- Multiconduttori 2D

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

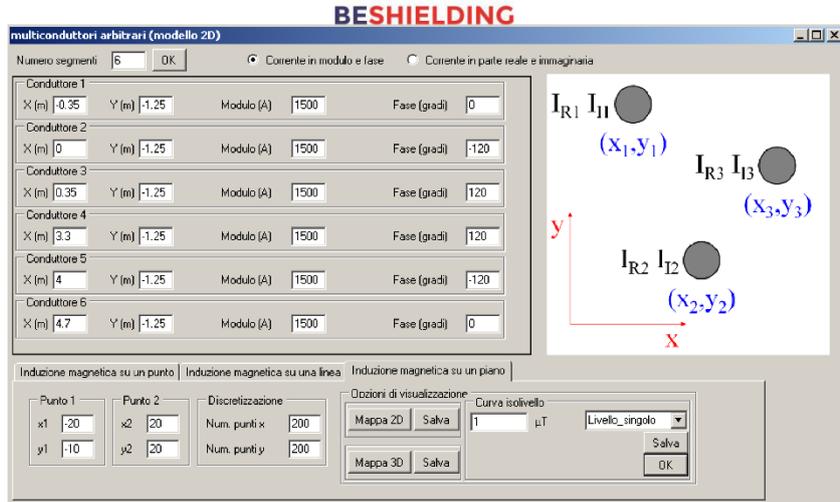


Figura 4: Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)”: dati definizione geometria e sorgenti

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

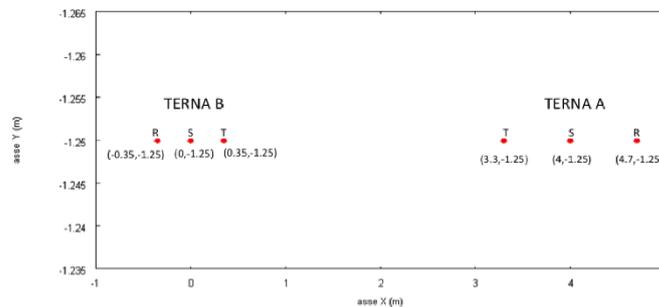


Figura 5: Geometria sorgenti

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

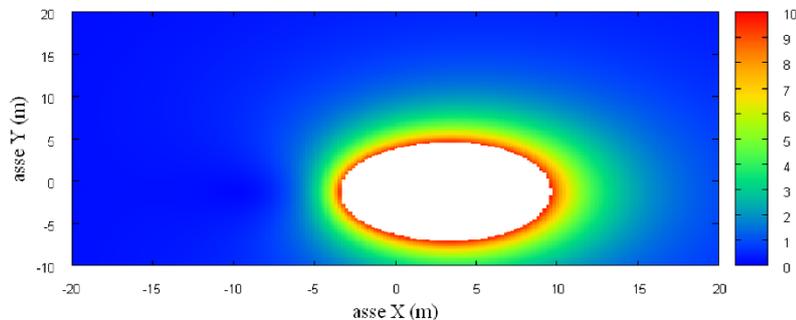


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):



BESHIELDING

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

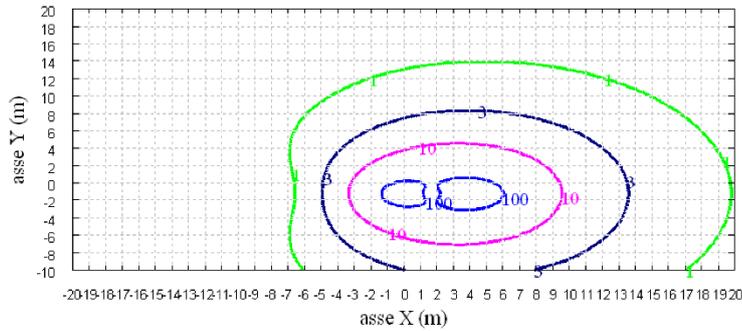


Fig. 7 Linee isolivello dell'induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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



2 Verifica del modulo tridimensionale

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

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

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.

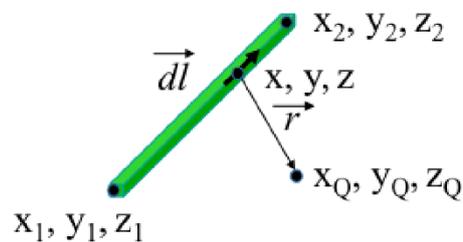


Fig. 8: Modello del segmento.

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



BESHIELDING

H_x , H_y e H_z (ovvero B_x , B_y e B_z). L'integrazione, sebbene sia macchinosa e porti ad espressioni analitiche poco compatte, può essere semplicemente risolta mediante l'utilizzo di un processore simbolico. Per tutti i dettagli circa l'integrazione si consideri la seguente referenza:

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

2.2 Validazione sperimentale del modulo tridimensionale

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

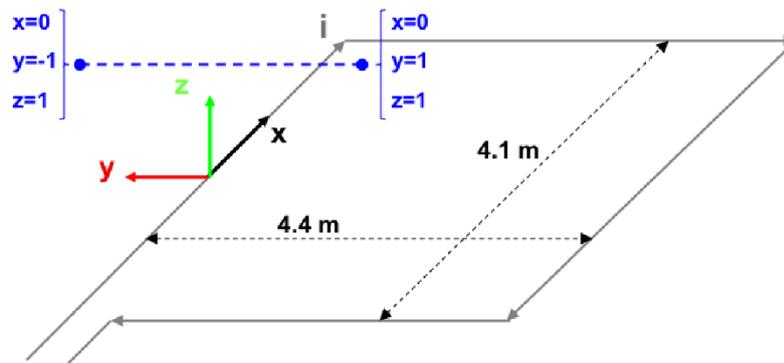


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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

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

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

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

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



BESHIELDING

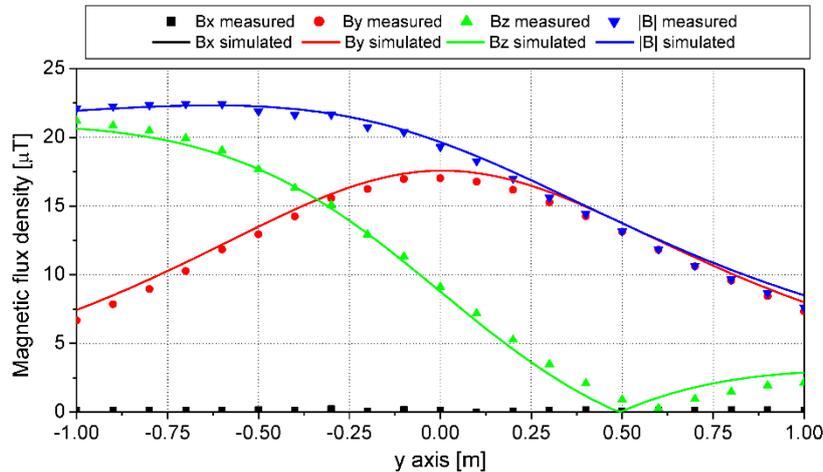


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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

3 Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza

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

La validazione è condotta in due step:

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

Maggiore dettaglio sui confronti sono riportati nella seguente referenza:

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

3.1 Verifica del modello MAGIC della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method)

MAGIC® propone due diversi modelli per il trasformatore: il primo di tipo semplificato e valido a partire da circa 0.5-1m dal trasformatore, il secondo più



BESHIELDING

rigoroso valido anche a piccole distanze dal trasformatore. Nel seguito i due modelli verranno indicati come Modello 1 e Modello 2.

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

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

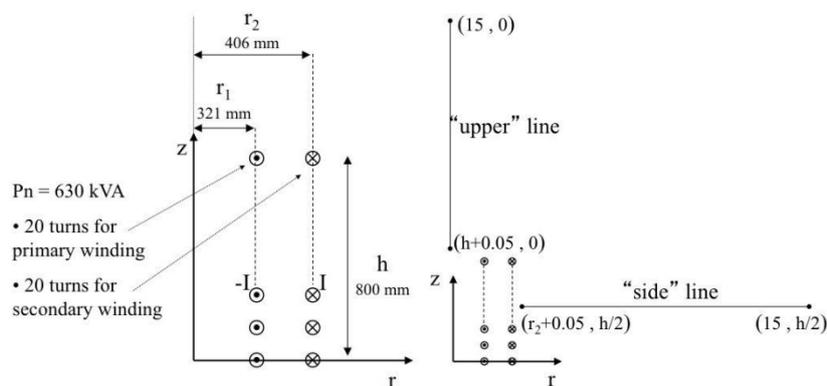


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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

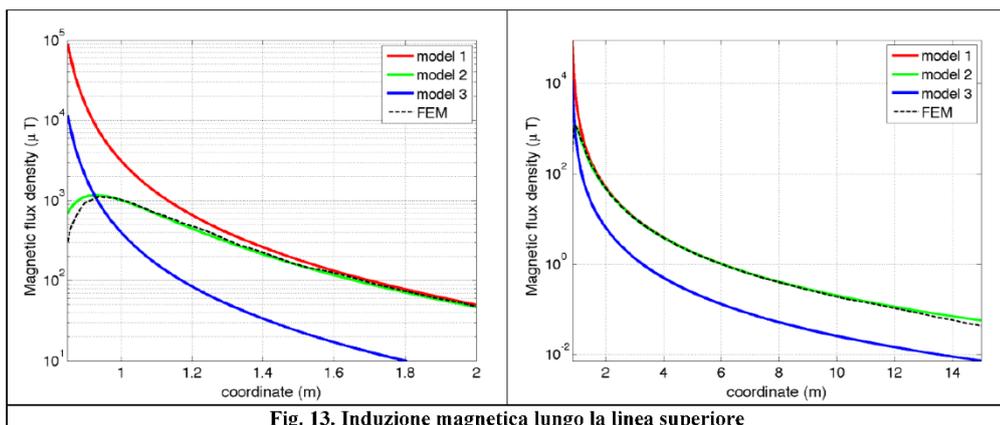
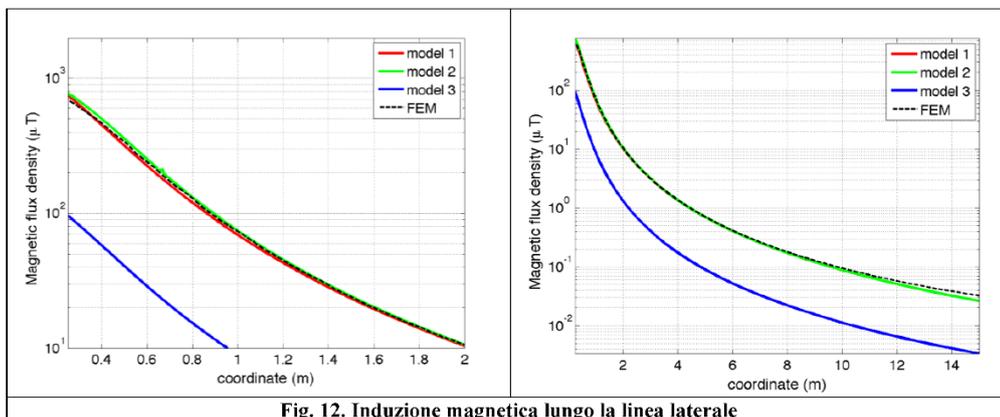
$$I = I_R \cdot \frac{V_{SC} \%}{100} \quad (14)$$

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



BESHIELDING

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



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

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

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

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

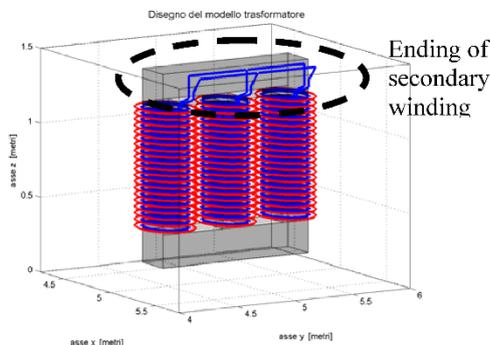


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

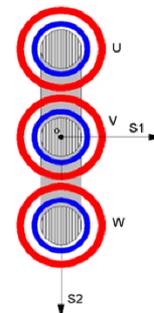


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2



BESHIELDING

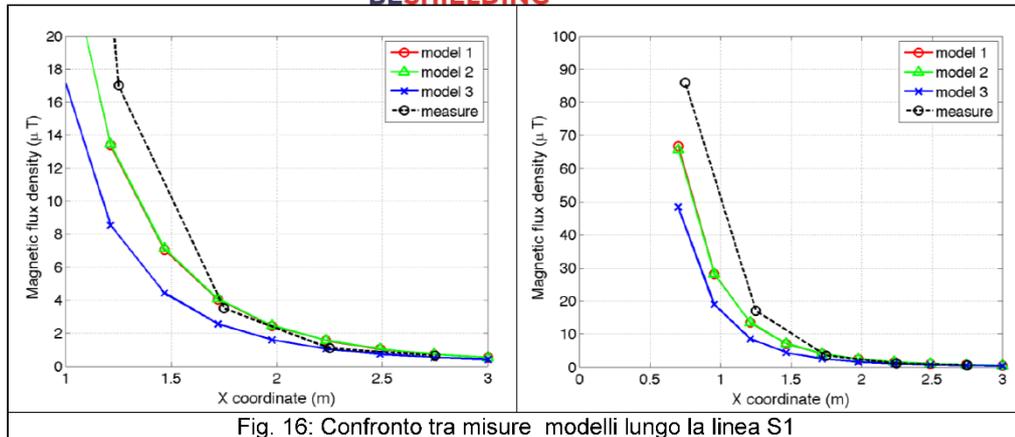


Fig. 16: Confronto tra misure e modelli lungo la linea S1

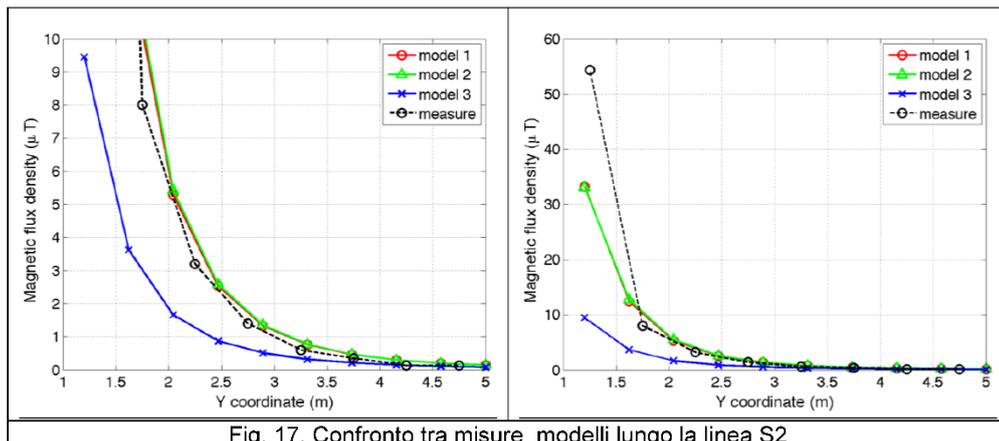


Fig. 17: Confronto tra misure e modelli lungo la linea S2

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



BESHIELDING

comprovante i criteri di cui sopra deve essere resa disponibile alle autorità competenti ai fini dei controlli”, può essere ritenuto idoneo allo scopo e, a tal fine, è stato redatto il presente documento.

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

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