

RELAZIONE SUGLI EFFETTI ELETTROMAGNETICI

**Realizzazione di un parco Agrivoltaico di potenza
nominale pari a 42 MWp, denominato
“MACOMER 4”
sito nel Comune di Macomer (NU).**

Località “Nuraghe Solene”.

PROPONENTE:



Energia Pulita Italiana 3 s.r.l.

Rev00		Data ultima elaborazione: 13/06/2022	
Redatto	Formattato	Verificato	Approvato
Ing. E. Canterino	Dott. G. Quadrio	Ing. E. Canterino	ENERLAND ITALIA s.r.l.
Codice Elaborato		Oggetto	
MACOMER4-PDR13		PROGETTO DEFINITIVO	

TEAM ENERLAND:

Ing. Emanuele CANTERINO
Dott. Claudio BERTOLLO
Dott. Guglielmo QUADRIO

Dott. Agr. Patrick VASTA
Ing. Annamaria PALMISANO
Dott.ssa Nausica RUSSO
Dott.ssa Ilaria CASTAGNETTI

GRUPPO DI LAVORO:

Geol. Nicola PILI
Ing. Marta ZICCHEDDU
Dott. Rosario PIGNATELLO
Ing. Gianluca VICINO
Ing. Fabio Massimo CALDERARO
Ing. Vincenzo BUTTAFUOCO
Dott. Agr. Vincenzo SATTA



INDICE

1.	GENERALITÀ	1
1.1	Descrizione del progetto	1
1.2	Tipo e ubicazione dell'immobile.....	1
1.3	Caratteristiche generali.....	1
2.	NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	3
3.	FONTI DI EMISSIONE	5
3.1	Elettrodotto BT.....	6
3.2	Elettrodotto AT.....	6
3.3	Cabine AT/BT di sottocampo.....	7
3.4	Cabina AT di consegna.....	7
4.	VALORI LIMITE DI RIFERIMENTO	8
4.1	Valori limite del campo magnetico.....	8
4.2	Valori limite del campo elettrico	9
5.	CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DAGLI ELETTRODOTTI BT	10
6.	CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DAGLI ELETTRODOTTI AT	11
7.	CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DALLE CABINE AT/BT DI SOTTOCAMPO	13
8.	CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DALLA CABINE AT DI CONSEGNA.....	14
9.	CONCLUSIONI	15
9.1	Elettrodotti BT.....	15
9.2	Elettrodotti AT.....	15
9.3	Cabine AT/BT di sottocampo.....	16
9.4	Cabina AT di consegna.....	16
10.	DOCUMENTO DI VALIDAZIONE SOFTWARE DI CALCOLO	18



1. GENERALITÀ

1.1 Descrizione del progetto

La presente relazione descrittiva riguarda la valutazione dei campi elettromagnetici (radiazioni non ionizzanti) relativi all'impianto elettrico interno (fino alla cabina di consegna AT comprensiva del cavidotto esterno che si attesterà futura stazione elettrica di trasformazione (SE) 380/150/36 kV denominata "Macomer 380") di una centrale fotovoltaica per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile solare denominato "Macomer 4" con una potenza di picco nominale di 42 MWp.

L'impianto sarà del tipo grid - connected e l'energia elettrica prodotta sarà riversata completamente in rete, salvo gli autoconsumi di centrale, con connessione alla rete di trasmissione in Alta Tensione mediante la futura stazione elettrica di trasformazione (SE) 380/150/36 kV denominata "Macomer 380" da inserire in entra - esci sulla linea esistente RTN a 380 kV "Ittiri-Selargius", di cui al Piano di Sviluppo Terna.

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

1.2 Tipo e ubicazione dell'immobile

L'impianto fotovoltaico è localizzato in località "Nuraghe Solene" in agro del Comune di Macomer (NU).

1.3 Caratteristiche generali

L'impianto fotovoltaico in esame sarà connesso direttamente alla rete AT previa realizzazione di una stazione elettrica di trasformazione (SE) 380/150/36 kV denominata "Macomer 380".

L'impianto avrà una potenza di picco pari a **42 MWp**, pari alla somma delle potenze nominali dei moduli fotovoltaici installati, e una potenza in immissione alla RTN di **45 MW**, pari alla somma delle potenze in uscita (lato AC) degli inverter fotovoltaici presenti in impianto (**35 MW**), e dei **10 MW** del sistema di **storage**.

I moduli fotovoltaici saranno installati a terra mediante tracker monoassiali. I pannelli fotovoltaici, ciascuno con potenza nominale di picco pari a 570 Wp, saranno raggruppati in stringhe da 28 moduli.

Dal campo fotovoltaico agli inverter, dislocati in prossimità dei moduli fotovoltaici stessi, sono distribuite le linee DC in cavo interrato che collegano i moduli direttamente allo stadio di ingresso DC degli inverter.

Per ciascuna delle 7 cabine sono previsti **22 inverter fotovoltaici da 250 kW** ciascuno per un totale di 5000kW/sottocampo. Le **linee BT** a 800 V, provenienti dagli inverter di ciascun sottocampo, sono realizzate con **cavi unipolari posati a trifoglio in cavidotto interrato**. Nella situazione più gravosa sono presenti **3 linee (9 conduttori unipolari attivi) nello stesso scavo**. Le 22 linee bt di ciascun sottocampo convergono ad una cabina di trasformazione AT/BT contenente un quadro AT che contiene al suo interno due celle di risalita cavi per i rispettivi trasformatori ed un'unica cella di protezione AT 36 kV isolata in SF6, n. 2 trasformatori AT/BT 36kV/800V da 2500 kVA, un quadro BT. Sono presenti 7 cabine di trasformazione AT/BT di sottocampo, da ciascuna cabina parte **1 linea AT a 36 kV RG7H1R o RG16H1R12 costituita da una terna di cavi unipolari elicordati interrati**, le cabine sono accoppiate a due a due in entra esce, andando a formare in questo modo **2 dorsali**, con potenza trasportata e sezione progressivamente crescente. Le due dorsali raggruppano rispettivamente, **3 e 4 cabine** per poi convergere verso la cabina AT di consegna. La cabina AT di consegna contiene n. 2 scomparti AT, sui quali si attestano le 2 linee AT provenienti dalle dorsali. Gli scomparti AT convergono verso un interruttore generale AT presente anch'esso all'interno della cabina di consegna assieme ad un ulteriore interruttore di backup.

Dal generale AT partono **3 linee in cavo ciascuna delle quali costituita da una terna di cavi unipolari AT a 36 kV RG7H1R o RG16H1R12 con posa a trifoglio** che collegano l'impianto alla cabina di consegna finale in prossimità della stazione "Macomer 380" a cui si attesterà.

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

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

- Regio Decreto 11 dicembre 1933, n. 1775 "Testo unico delle disposizioni di legge sulle acque e impianti elettrici;
- Legge 23 luglio 2009, n° 99 , "Disposizioni per lo sviluppo e l' internazionalizzazione delle imprese, nonché in materia di energia";
- Decreto del 27/02/09 , Ministero della Sviluppo Economico;
- Decreto del 29/05/08, "Approvazione delle procedure di misura e valutazione dell' induzione magnetica";
- DM del 29.5.2008, "Approvazione della metodologia di calcolo delle fasce di rispetto per gli elettrodotti";
- Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 08/07/2003, "Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti", G.U. 28 agosto 2003, n. 200;
- Legge quadro 22/02/2001, n. 36, "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici", G.U. 7 marzo 2001, n.55;
- Norma CEI 106 - 11 "Guida per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti secondo le disposizioni del DPCM 8 luglio 2003 (Art. 6) – Parte 1: Linee elettriche aeree e in cavo";
- Norma CEI 211 - 4 "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche";
- Norma CEI 211 - 6 "Guida per la misura e la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz – 10 kHz, con riferimento all'esposizione umana".

- Norma CEI 11 - 17: Impianti di produzione, trasmissione e distribuzione di energia elettrica –

Linee in cavo.

3. FONTI DI EMISSIONE

Le apparecchiature elettromeccaniche e le linee elettriche previste nella realizzazione del parco fotovoltaico 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) linee elettriche BT:

b) elettrodotto AT di interconnessione fra le cabine AT di impianto;

c) elettrodotto AT di vettoriamento dell'energia prodotta dalla Centrale fotovoltaica verso la stazione "Macomer 380" Terna;

2) le cabine AT contenenti le apparecchiature descritte al paragrafo 1.3.

Per quanto riguarda le linee interrato di collegamento in corrente continua tra i moduli fotovoltaici e gli inverter si consideri che:

- tale sezione di impianto è tutta esercita in **corrente continua (0 Hz)**;
- la buona esecuzione vuole che i cavi di diversa polarizzazione (+ e -) viaggino sempre a contatto, annullando quasi del tutto i campi magnetici **statici** prodotti in un punto esterno;

- la **raccomandazione 1999/519/CE** (una raccomandazione del Consiglio Europeo che stabilisce limiti da rispettare in caso di esposizione della popolazione) per i campi magnetici statici (frequenza 0 - 1 Hz) stabilisce un limite di riferimento per l'induzione magnetica che non deve essere superato pari di 40 mT (40.000 μ T), valore enormemente più alto dell'equivalente per la corrente a 50 Hz (valore di attenzione 3 μ T obbligatorio per tutte le nuove installazioni). Per quanto sopra detto, si può certamente escludere il superamento dei limiti di riferimento dei valori di campo magnetico statico dovuto alla sezione in corrente continua. Le rimanenti componenti dell'impianto (impianto di illuminazione BT, impianto TVCC e apparecchiature del sistema di controllo) sono state giudicate non significative dal punto di vista delle emissioni elettromagnetiche e, pertanto, non verranno trattate ai fini della valutazione.

Di seguito verrà data una caratterizzazione delle sorgenti appena individuate.

3.1 Elettrodotto BT

Le linee BT a 800 V che collegano gli inverter in campo alle cabine di trasformazione AT/BT, sono realizzate con terne di cavi unipolari e posa a trifoglio con conduttore in rame e isolante in gomma HEPR. Ciascuna linea porta una corrente massima pari a circa 180,5 A, corrispondente alla potenza nominale AC di ciascun inverter. Le linee sono posate entro cavidotti interrati.

3.2 Elettrodotto AT

Tutti i cavi di cui si farà utilizzo, sia per il collegamento interno dei sottocampi che per la connessione alla stazione elettrica Terna, saranno in rame con isolante in gomma. L'isolante dei cavi è costituito materiale in gomma HEPR, fra esso e il conduttore è interposto uno strato di mescola estrusa. Il cavo presenta uno schermo metallico. Sopra lo schermo metallico è presente una guaina protettiva a base di PVC.

In generale, per tutte le linee elettriche AT, si prevede la posa direttamente interrata dei cavi, senza ulteriori protezioni meccaniche. 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.

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

Le linee di collegamento tra le cabine AT/BT di sottocampo saranno realizzate con **terne di cavi unipolari elicordati direttamente interrati**. Le linee si dividono in 2 dorsali che raggruppano rispettivamente, 4 e 3 cabine ciascuna, per una potenza massima in AC trasportata in arrivo alla cabina di consegna rispettivamente di 20 MW e 15 MW ed una corrente massima rispettivamente di 337,7 A e 253,3 A ad una tensione di 36kV.

Le linee di collegamento tra la cabina di consegna e la futura stazione elettrica di trasformazione "Macomer 380" saranno realizzate con **terne di cavi unipolari con posa a trifoglio**. Lo studio verrà condotto sulla condizione più gravosa, dunque considerando 45 MW in immissione, dovuti al contributo proveniente dal campo fotovoltaico (35 MWac) e dal sistema di storage presente nei pressi

della stazione di storage "Macomer 380" (10 MW); sono previste n. 3 linee per un totale di 9 cavi unipolari con una intensità di corrente massima pari a circa 396.8 A ad una tensione di 36 kV.

3.3 Cabine AT/BT di sottocampo

Sono presenti n.7 Cabine AT/BT di sottocampo, ciascuna cabina contiene al suo interno:

- un quadro AT 36 kV;
- n. 2 trasformatori AT/BT 36kV/800V da 2500 kVA;
- un quadro BT;

La massima intensità di corrente sul lato BT sarà pari a circa 3970 A.

La massima intensità di corrente sul lato AT sarà pari a circa 88,4 A.

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

3.4 Cabina AT di consegna

La cabina contiene al suo interno:

- N. 2 due celle di risalita cavi e 2 scomparti (1 in funzione e 1 di backup) di protezione AT isolati in SF6.

La massima intensità di corrente sugli scomparti AT ad una tensione di 36 kV sarà pari a circa 590.9 A per la cabina di consegna all'interno del campo fotovoltaico e di 759.8 A per la cabina di consegna finale in prossimità alla SE "Macomer 380". Lo studio verrà condotto andando a valutare la condizione più gravosa, dunque, per la cabina di consegna finale.

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

4. VALORI LIMITE DI RIFERIMENTO

Nella redazione della relazione tecnica sui campi elettromagnetici è stato tenuto conto della normativa vigente in materia. In particolare, sono state recepite le indicazioni contenute nel DPCM 08/07/2003, il quale fissa i limiti di esposizione, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete generati dagli elettrodotti. Si è, inoltre, tenuto conto di quanto previsto dal DM 29/05/2008 per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti (metodologia di calcolo indicata dall'APAT), e della Legge quadro 22/02/2001, n. 36, "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici", G.U. 7 marzo 2001, n.55.

4.1 Valori limite del campo magnetico

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

Soglia	Valore limite del campo magnetico
Limite di esposizione	100 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 (da 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 μ T (da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio)

4.2 Valori limite del campo elettrico

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

5. CAMPO ELETTRICITÀ ELETTRICITÀ GENERATO DAGLI ELETTRICITÀ BT

Le linee BT in cavo interrato che vanno dagli inverter in campo alle cabine di trasformazione AT/BT di sottocampo, saranno realizzate con cavi unipolari di rame isolati con gomma HEPR e posati entro cavidotti interrati. L'analisi del campo magnetico generato dalle linee BT interrate, è stata condotta utilizzando un software specifico che utilizza le metodologie di calcolo della Norma CEI 211 - 4. In appendice alla presente relazione è allegato il "Documento di Validazione" dei calcoli fornito dal produttore del software stesso (Beshielding S.r.l). I risultati di tale analisi sono riportati graficamente nel documento MACOMER4-PDT13_Tavola degli effetti elettromagnetici. Sono stati analizzate le tre possibili situazioni di posa rispettivamente con 1, 2 e 3 linee BT. Dalle verifiche effettuate si ricava che, per i cavidotti in questione, l'induzione magnetica sarà $B < 3 \mu T$ già all'interno dello scavo a patto che la profondità di posa sia superiore a 1 m.

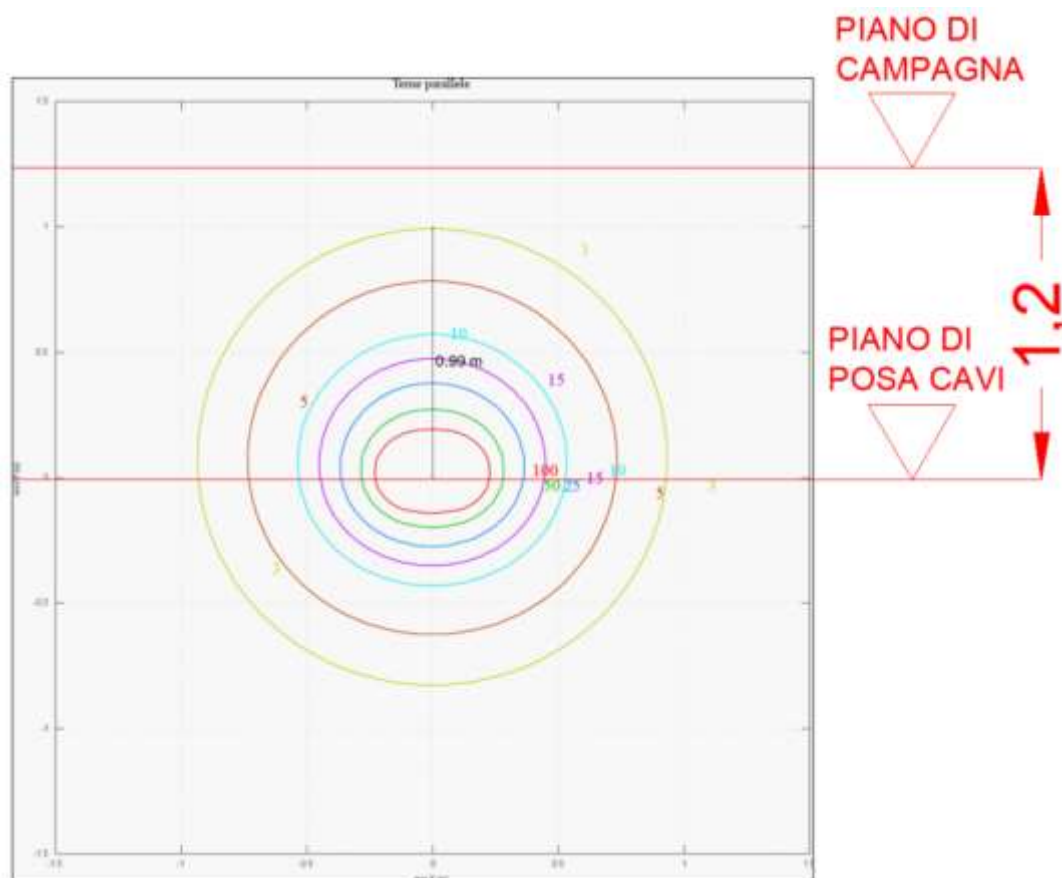


FIGURA 1: CURVE ISOINDUZIONE – 3 LINEE BT INTERRATE

6. CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DAGLI ELETTRODOTTI AT

Quella che viene presentata in questi paragrafi 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 norma CEI 106 - 11.

Per la valutazione del campo magnetico generato dall'elettrodotto occorre innanzitutto distinguere gli elettrodotti in funzione della tipologia dei cavi utilizzati. Il progetto, infatti, prevede l'utilizzo di terne di cavi unipolari in rame elicordati ad elica visibile per sezioni fino a 300 mm² e cavi unipolari con posa a trifoglio per le linee di sezione maggiore. I cavi in progetto che vanno dalle cabine di trasformazione AT/BT alla cabina di consegna presentano tutti una configurazione ad elica visibile. Dalla normativa citata, le particolarità costruttive di questi cavi, ossia la ridotta distanza tra le fasi e la loro continua trasposizione dovuta alla cordatura, fanno sì che il campo magnetico prodotto sia notevolmente inferiore a quello prodotto da cavi analoghi posati in piano o a trifoglio. In aggiunta a questa prima considerazione, si fa notare come 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".

Essendo la tipologia di cavi adottata la stessa delle linee MT, la tensione di un valore prossimo alla media tensione e considerando che l'intensità del campo magnetico è dipendente dall'intensità

della corrente circolante nei cavi, si può ritenere che le suddette linee AT di connessione tra cabine ricadano nella casistica sopracitata.

Trattandosi nei casi in questione di un elettrodotto interrato in cavo cordato ad elica, come evidenziato in precedenza, non è necessario alcuno studio circa i campi magnetici generati dai cavi che vanno dalle cabine di sottocampo alla cabina di consegna.

Per le suddette linee è sufficiente quindi una semplice analisi qualitativa per affermare che l'induzione magnetica è inferiore ai valori limite richiesti dalla normativa e dalle leggi vigenti.

Le linee AT a 36 kV che vanno **dalla cabina di consegna di campo alla cabina di consegna finale in prossimità della stazione Terna "Macomer 380"** a cui si attesterà, sono realizzate con cavi unipolari e **posa a trifoglio**. Per tali linee non è applicabile l'art. 3.2 dell'allegato al D.M. 29/05/2008. In questo caso, l'analisi del campo magnetico generato dalle linee AT interrate, è stata condotta utilizzando un software specifico che utilizza le metodologie di calcolo della Norma CEI 211 - 4. In appendice alla presente relazione è allegato il "Documento di Validazione" dei calcoli fornito dal produttore del software stesso (Beshielding S.r.l). I risultati di tale analisi sono riportati graficamente nel documento MACOMER4-PDT13_Tavola degli effetti elettromagnetici. Da tale documento si ricava che, per i cavidotti in questione nella condizione più gravosa, l'induzione magnetica sarà **$B < 3 \mu\text{T}$** già all'interno dello scavo a patto che la profondità di posa sia almeno a **1,5 m**.

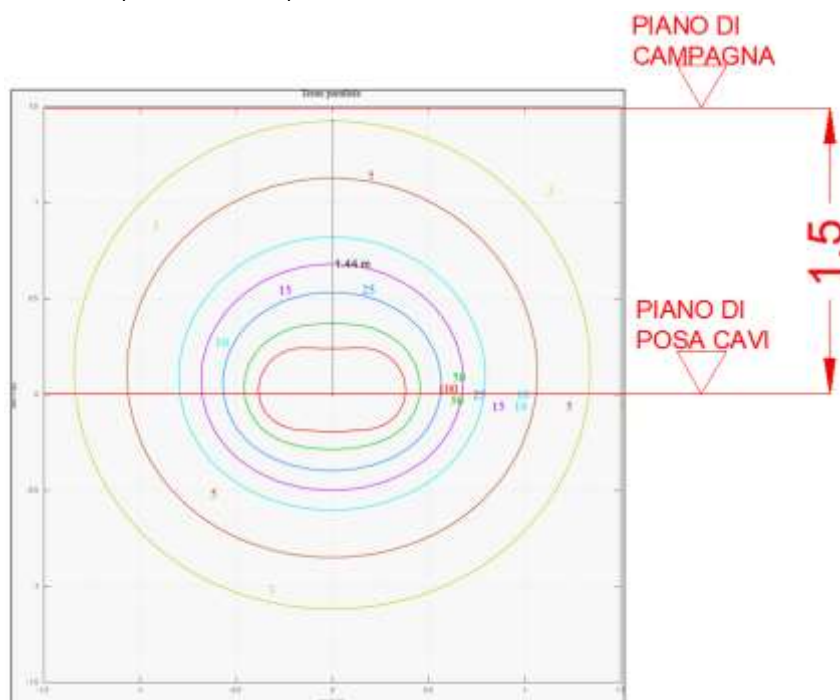


FIGURA 2: CURVE ISOINDUZIONE – 3 LINEE AT INTERRATE

7. CAMPO ELETTRICOMAGNETICO GENERATO DALLE CABINE AT/BT DI SOTTOCAMPO

L'analisi del campo magnetico generato dalle cabine di trasformazione AT/BT è stata condotta utilizzando il software specifico che utilizza le metodologie di calcolo della Norma 211 - 4. E' allegato alla presente relazione un "Documento di Validazione" fornito dal produttore del software stesso.

I valori dell'induzione magnetica all'esterno di ciascuna cabina sono stati ricavati inserendo all'interno del box, tutti i componenti in grado di generali campi magnetici apprezzabili. Il risultato ottenuto è rappresentato nei grafici riportati sul documento di progetto MACOMER4-PDT13_Tavola degli effetti elettromagnetici e mostra che, all'esterno di ciascuna cabina di sottocampo, la distanza oltre la quale il valore dell'induzione magnetica $B < 3 \mu T$ è sempre inferiore a **5 metri** sia in orizzontale sia in verticale. Si assume pertanto, per tutte le cabine AT/BT di sottocampo, una **DPA=5 m sia in orizzontale sia in verticale a partire dalle pareti della cabina stessa.**

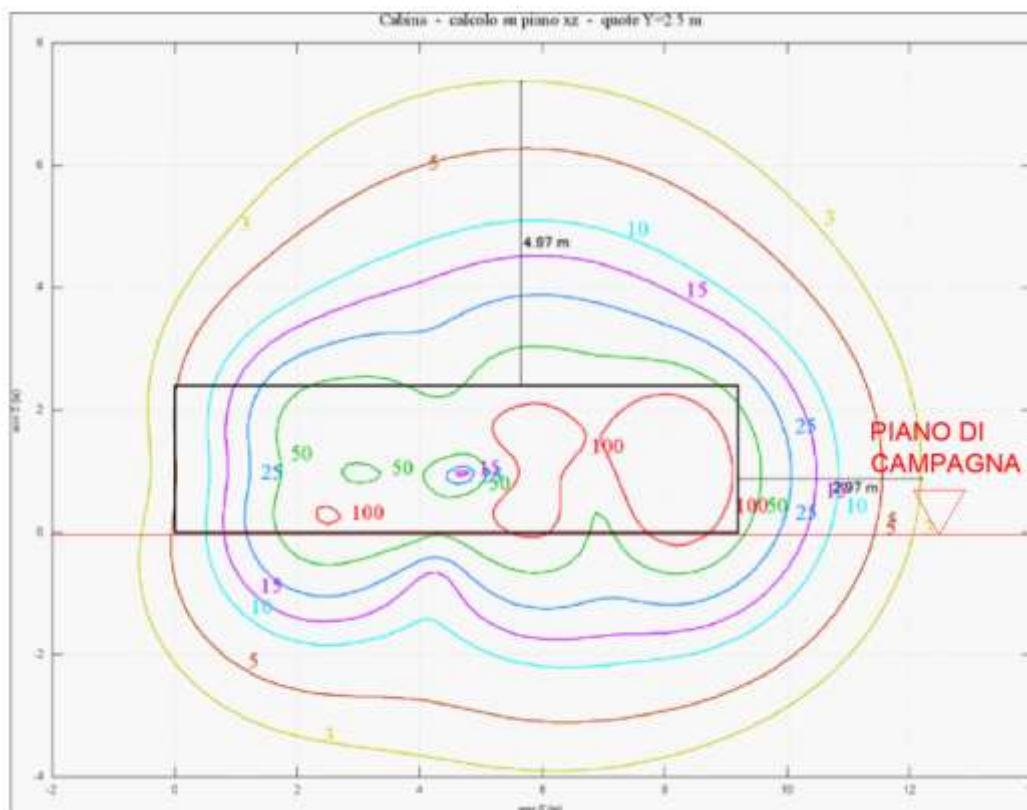


FIGURA 3: CURVE ISOINDUZIONE CABINA AT/BT DI SOTTOCAMPO (PROSPETTO FRONTALE)

8. CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DALLA CABINE AT DI CONSEGNA

L'analisi del campo magnetico generato dalla cabina di consegna AT è stata condotta utilizzando il software specifico che utilizza le metodologie di calcolo della Norma 211 - 4. E' allegato alla presente relazione un "Documento di Validazione" fornito dal produttore del software stesso. I valori dell'induzione magnetica all'esterno della cabina sono stati ricavati inserendo all'interno del box, tutti i componenti in grado di generali campi magnetici apprezzabili. Il risultato ottenuto è rappresentato nei grafici riportati sul documento di progetto MACOMER4-PDT13_Tavola degli effetti elettromagnetici e mostra che, all'esterno della cabina di consegna, 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 la cabina di consegna, una **DPA=2 m** sia in orizzontale sia in verticale a partire dalle pareti della cabina stessa.

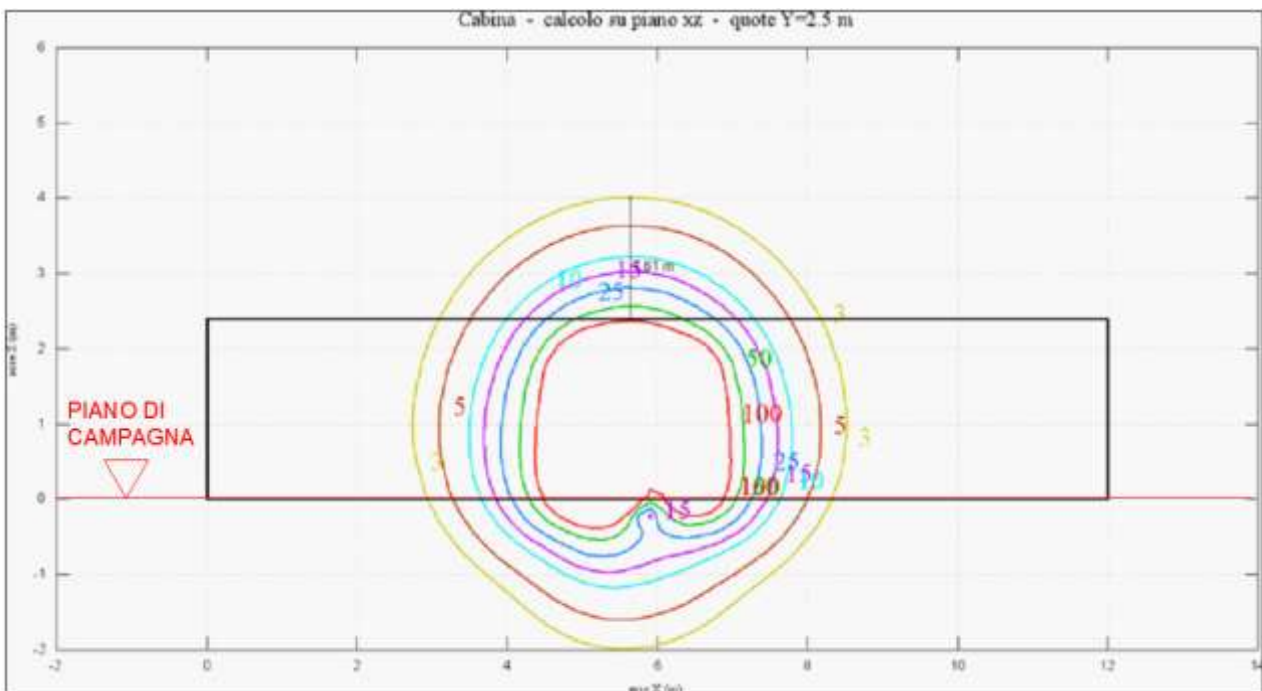


FIGURA 4: CURVE ISOINDUZIONE CABINA AT DI CONSEGNA (PROSPETTO FRONTALE)

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 BT

Sono presenti cavi unipolari interrati disposti a trifoglio per i quali è stato condotto uno studio specifico che ha mostrato che l'induzione magnetica, al di fuori dello scavo, è inferiore ai limiti di legge. Per essi non è necessaria l'apposizione di alcuna fascia di rispetto.

Per la rappresentazione grafica, fare riferimento alla tavola MACOMER4-PDT13_Tavola degli effetti elettromagnetici.

9.2 Elettrodotti AT

Sono presenti sia cavi unipolari ad elica visibile interrati, i cui campi elettromagnetici sono trascurabili, sia cavi unipolari interrati con posa a trifoglio per i quali è stato condotto uno studio specifico che ha mostrato che l'induzione magnetica, al di fuori dello scavo, è inferiore ai limiti di legge. Per essi non è necessaria l'apposizione di alcuna fascia di rispetto.

Per la rappresentazione grafica, fare riferimento alla tavola MACOMER4-PDT13_Tavola degli effetti elettromagnetici.

9.3 Cabine AT/BT di sottocampo

Per il suddetto componente è stata ricavata, mediante l'utilizzo di software specifico, una **DPA di 5 m** sia in orizzontale sia in verticale a partire dalle pareti della Power station 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 MACOMER4-PDT13_Tavola degli effetti elettromagnetici.

9.4 Cabina AT di consegna

Per il suddetto componente è stata ricavata, mediante l'utilizzo di software specifico, una **DPA di 2 m** sia in orizzontale sia in verticale a partire dalle pareti della Power station 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 MACOMER4-PDT13_Tavola degli effetti 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 dell'impianto 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 dell'impianto e della SSEU (individuabili come interne all'azienda) 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)

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 \mathbf{B} è data dall'espressione:

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

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

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



BESHIELDING

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

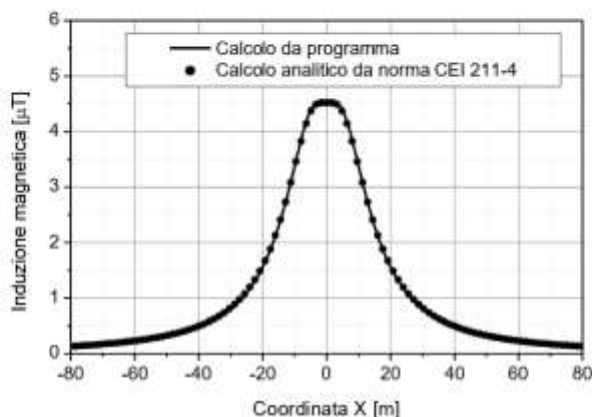


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310; confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

1.2 Confronto con codice CESI

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

- Buca giunti (interasse 70 cm e livello di 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

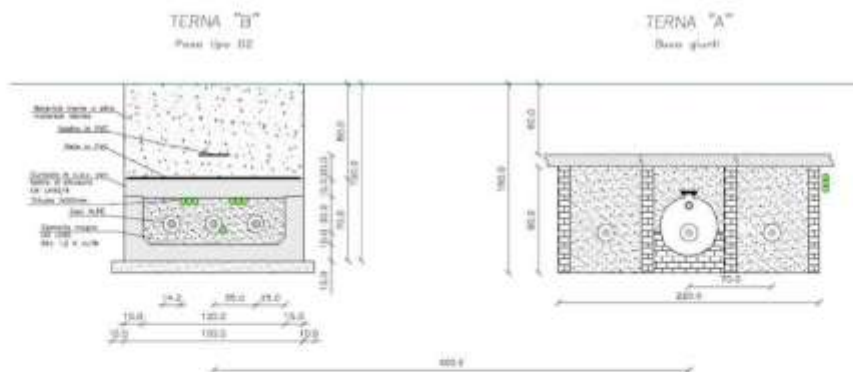


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT



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.

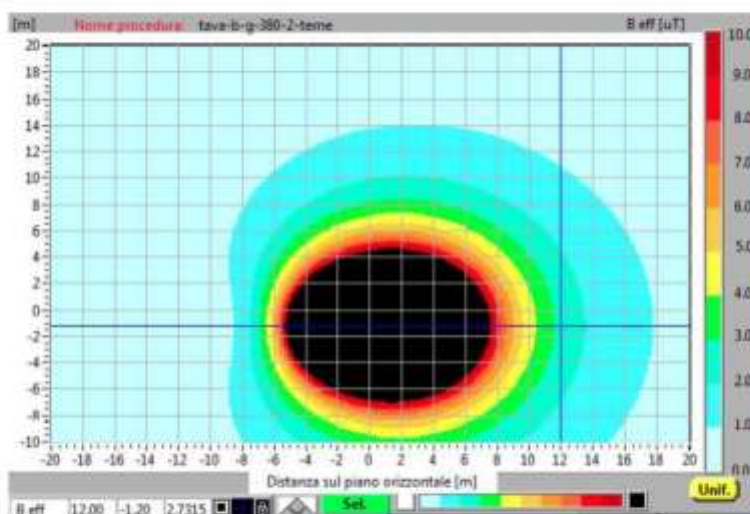


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.



BESHIELDING

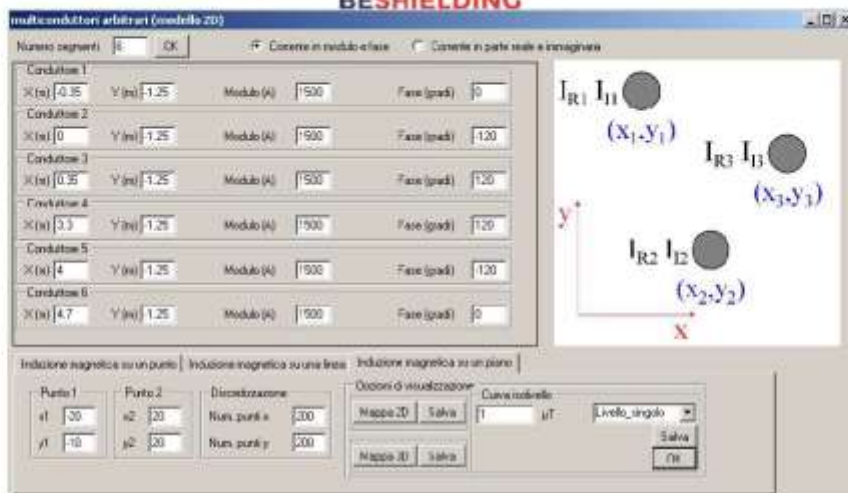


Figura 4:Schermata di ingresso modulo "multiconduttori arbitrari (modello 2D)": dati definizione geometria e sorgenti

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

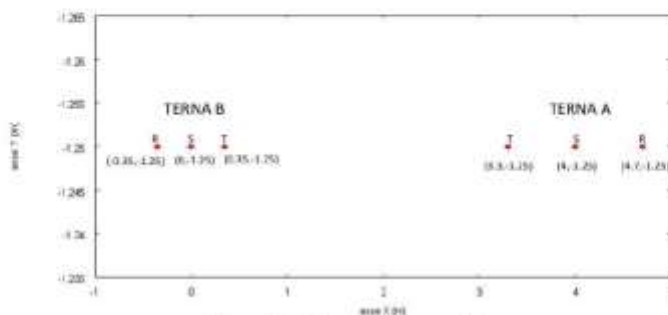


Figura 5: Geometria sorgenti

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

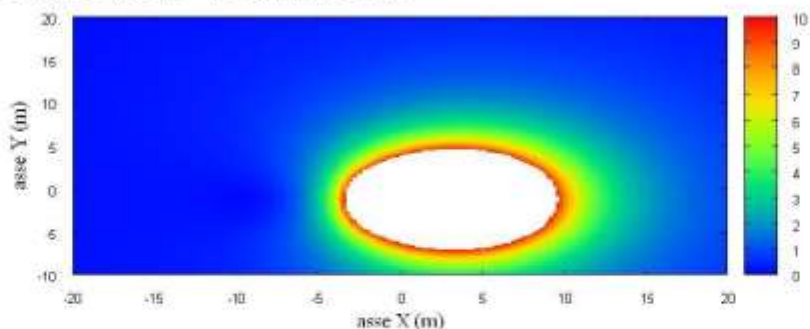


Fig. 6: Mappa cromatica dell'induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):



BESIELDING

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

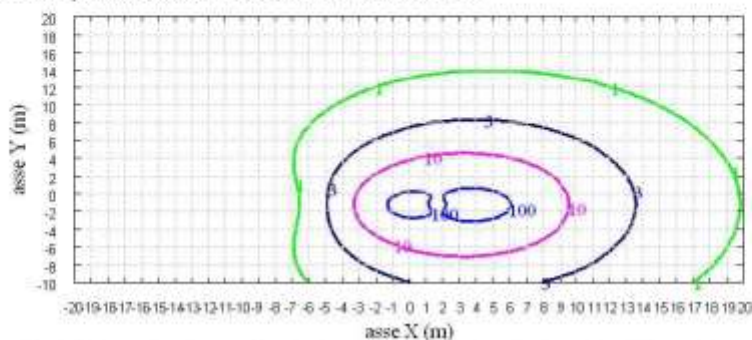


Fig. 7 Linee isolivello dell'induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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



2 Verifica del modulo tridimensionale

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

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

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

2.1 Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato

Si consideri il segmento rappresentato nella Fig. 8.

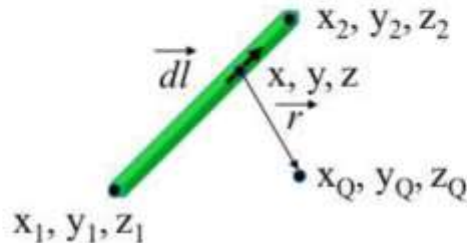


Fig. 8: Modello del segmento.

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

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

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

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

Si consideri inoltre che:

$$r = (x_Q - x)a_x + (y_Q - y)a_y + (z_Q - z)a_z$$

$$dl = dx a_x + dy a_y + dz a_z$$

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.

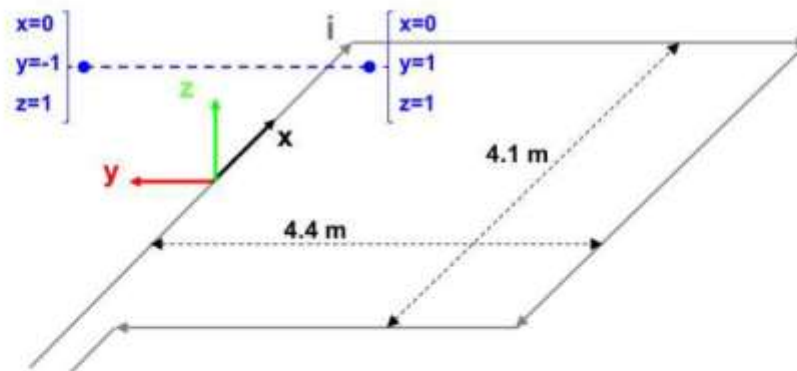


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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.

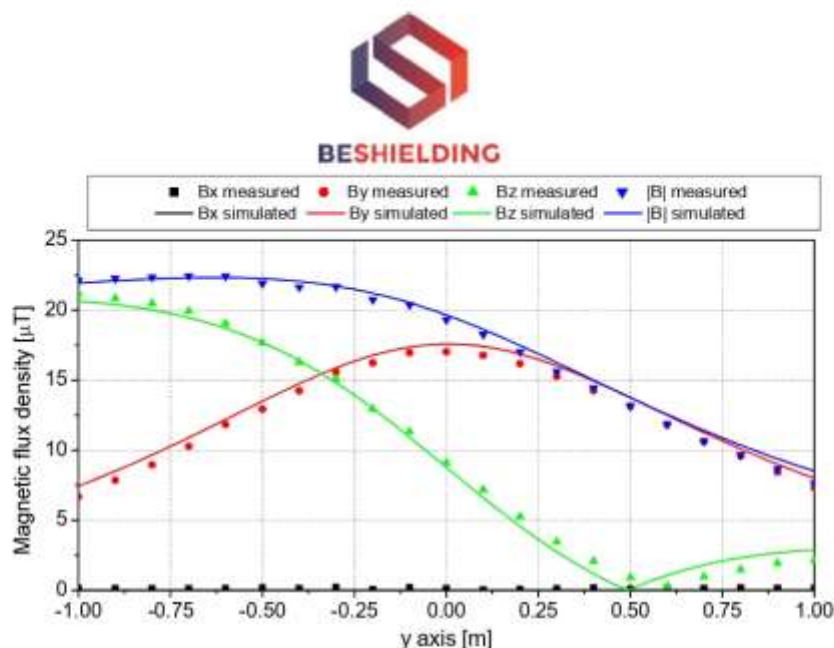


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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.

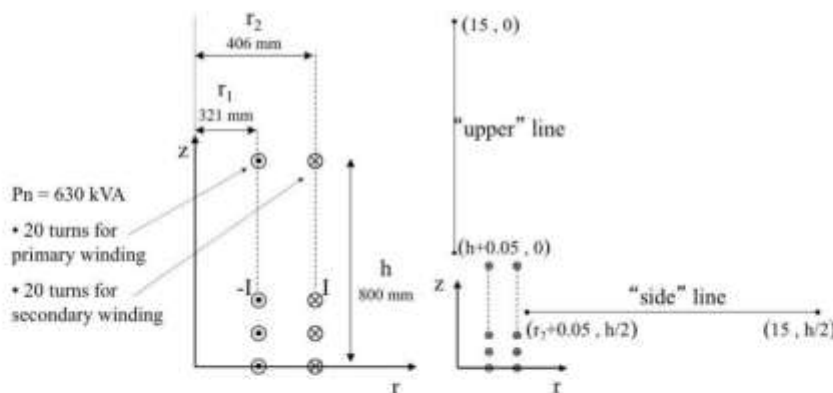


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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).

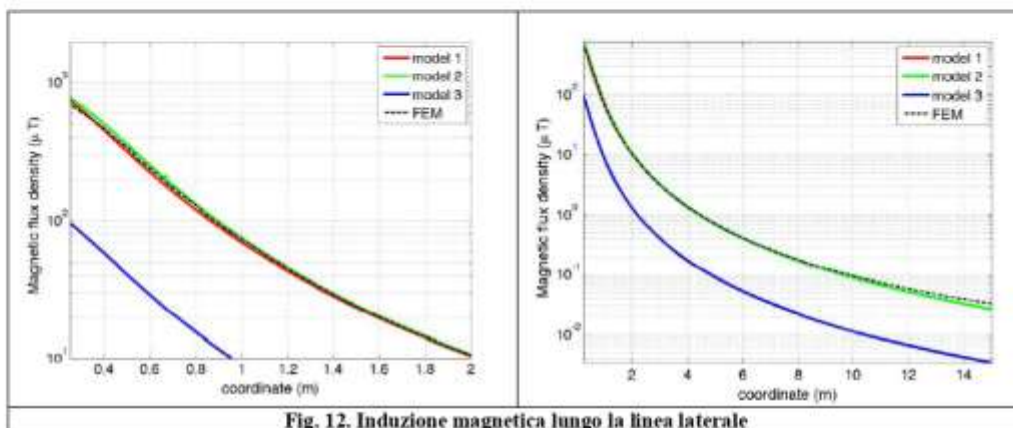


Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale

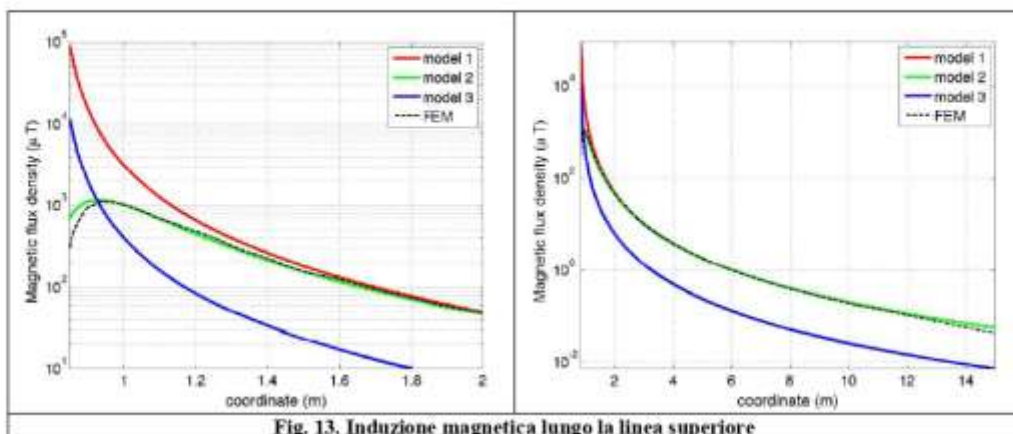


Fig. 13. Induzione magnetica lungo la linea superiore

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



3.2 Verifica del modello MAGIC del trasformatore completo con misure sperimentali

In questo paragrafo 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. È importante sottolineare che il contributo dei terminali di BT influisce significativamente il campo magnetico ambientale, specialmente nella direzione S1. Pertanto, l'introduzione di tali sorgenti addizionali agli avvolgimenti porta ad una riduzione degli scostamenti tra i vari modelli.

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

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

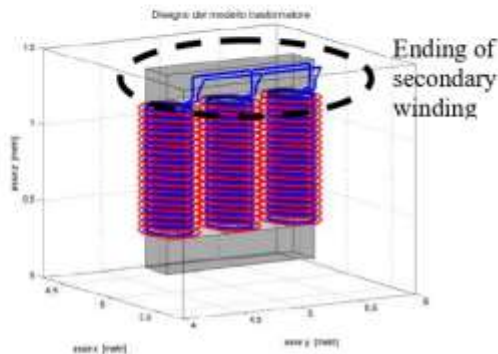


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

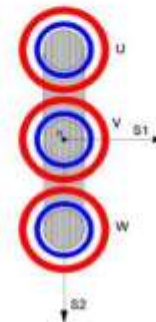


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2



BESHIELDING

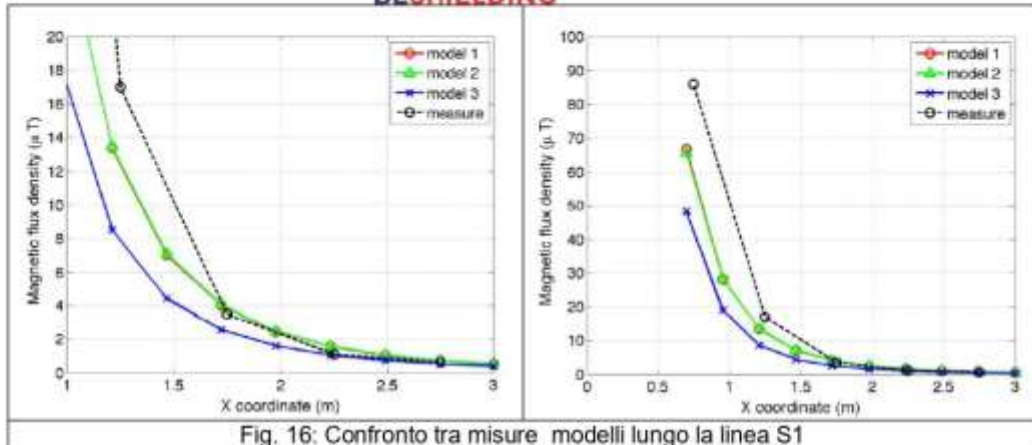


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

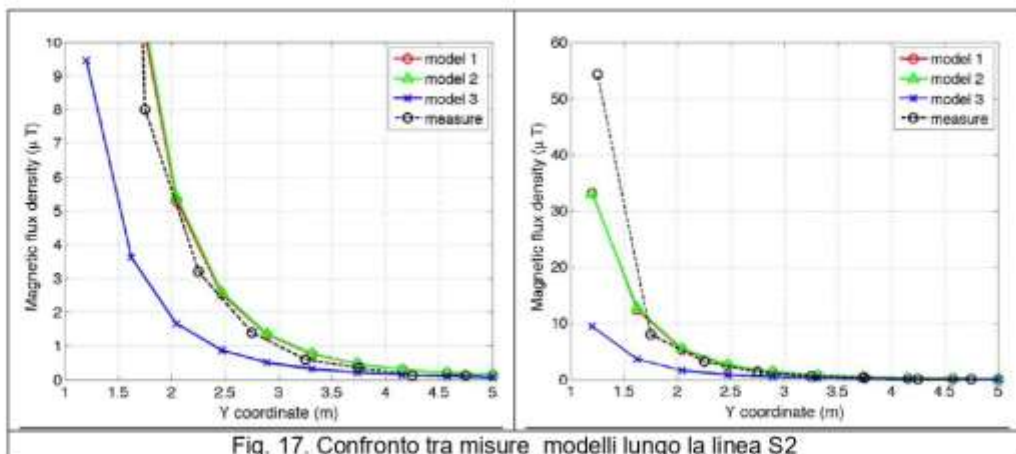


Fig. 17: Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

Conclusioni

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

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

"...i modelli utilizzati devono essere descritti in termini di algoritmi implementati, condizioni al contorno e approssimazioni attuate. Essi devono essere validati attraverso misure o per confronto con modelli che abbiano subito analogo processo di verifica. La documentazione esplicitiva e

**BESHIELDING**

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

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

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