

Flavio Brusaporci



B	28/03/22	Graziano	Bolognesi	Brugnoli	Aggiornamento tabella 1 e 4 a seguito commenti del 17/03/22
A	14/03/22	Bertani	Bolognesi	Brugnoli	Emissione per autorizzazione
REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE
COMMITTENTE DS ITALIA 1 SRL					IMPIANTO ROTELLO 52.7
INGEGNERIA & COSTRUZIONI 					TITOLO RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI ELETTRODOTTO MT
SCALA	FORMATO	FOGLIO / DI		N. DOCUMENTO	
-	A4	1 / 27		1 4 2 0 4 B	

SOMMARIO

1	PREMESSA	3
2	QUADRO NORMATIVO	4
3	CALCOLO DEL CAMPO MAGNETICO.....	5
3.1	Correnti di calcolo.....	6
3.2	Risultati.....	6
4	CONCLUSIONI	13

1 PREMESSA

Oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dai cavidotti in media tensione funzionali alla connessione di un impianto fotovoltaico del produttore DS Italia 1 Srl, avente una potenza nominale complessiva di 55,9 MVA ed ubicato nel Comune di Rotello in Provincia di Campobasso.

I cavidotti interrati, collegheranno l'impianto fotovoltaico, suddiviso in quattro sottoparchi principali N-W-S-E composti dalle aree 1-2, 3-4, 8-9-10-11 e 5-6-7, alla cabina di trasformazione 30/150 kV del produttore ubicata a sua volta all'interno di un punto di raccolta 150 kV condiviso con altri 4 produttori e denominato "Piana della Fontana".

La connessione in media tensione sarà realizzata con quattro cavidotti principali denominati N-W-S-E e due cavidotti secondari denominati N1 e E1. Ciascun cavidotto sarà composto da una terna di cavi. In riferimento alla configurazione dei conduttori il percorso può essere suddiviso in nove tratte, come sintetizzate in tabella 2.

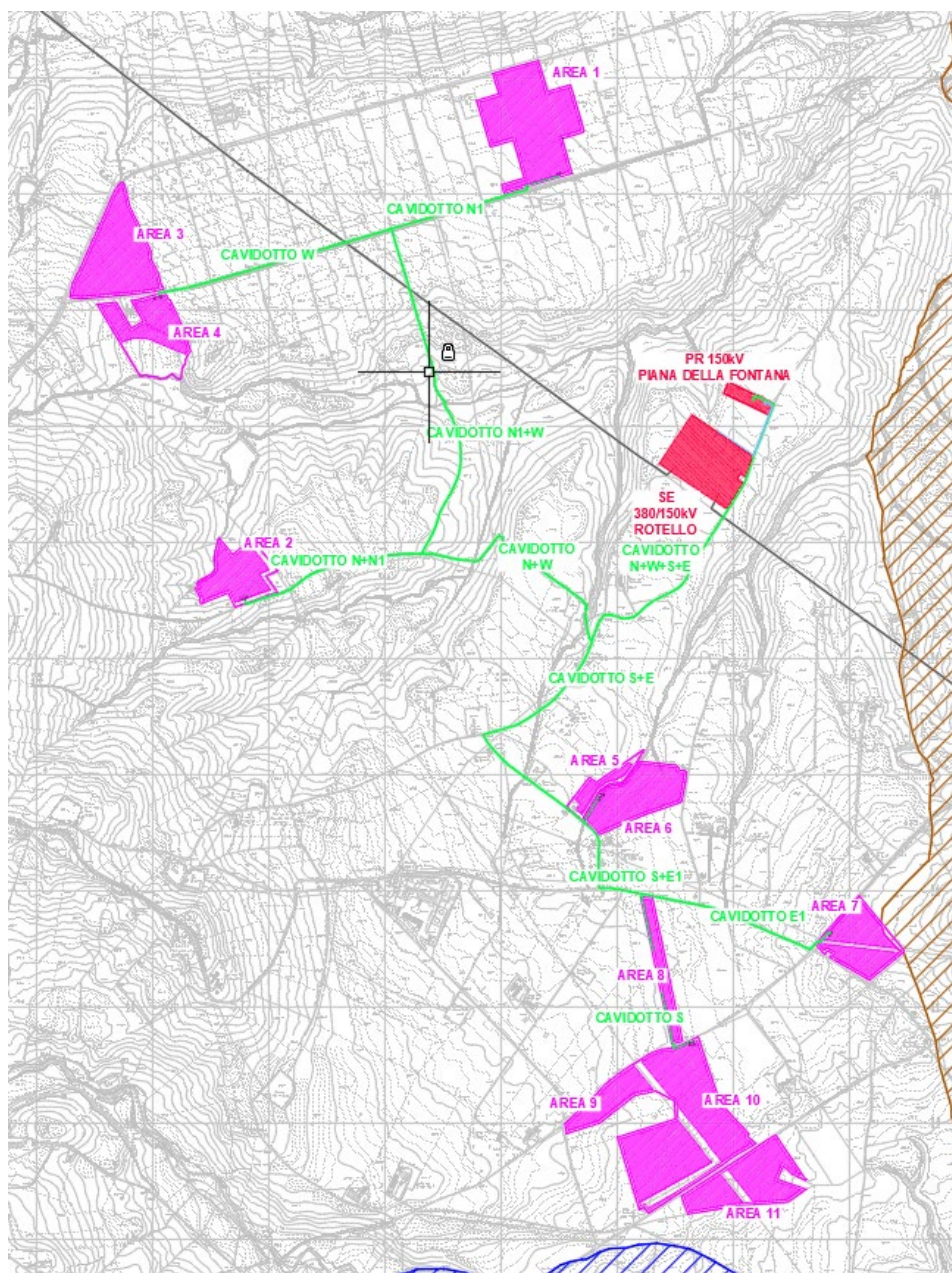


Figura 1: Planimetria CTR con indicazione dei percorsi dei cavidotti

Per tutti i cavidotti saranno posate terne di cavo unipolare del tipo ARE4H1R 18/30 kV. Il percorso dei cavidotti MT è rappresentato nel documento 14232 – Inquadramento CTR, di cui riportiamo in figura 1 lo stralcio.

Nella tabella seguente sono sintetizzati i dati principali riferiti ai cavidotti MT in esame:

Impianto	Cavidotto	Partenza	Arrivo	Potenza in transito (MVA)	km	Formazione
ROTELLO 52.7	N1	Area 1 – Cabina MT/BT	Area 2 – SC-N	9,588	3,17	3x1x400
	W	Area 4 – SC-W	PR Piana della Fontana	9,180	5,09	3x1x400
	S	Area 10 – SC-S	PR Piana della Fontana	25,500	4,00	3x1x630
	E	Area 6 – SC-E	PR Piana della Fontana	8,568	2,86	3x1x185
	N	Area 2 - SC-N	PR Piana della Fontana	12,648	3,37	3x1x400
	E1	Area 7 – Cabina MT/BT	Area 6 – SC-E	3,264	1,52	3x1x185

Tabella 1

Impianto	Tratta	Cavidotti	km
ROTELLO 52.7	1	N1	0,79
	2	W	1,06
	3	N1 + W	1,49
	4	N1 + N	0,83
	5	N + W	1,05
	6	S	0,79
	7	E1	0,90
	8	S + E1	0,49
	9	E + E1	0,14
	10	S + E	1,23
	11	N + W + S + E	1,50

Tabella 2

La presente relazione tratta dei soli cavidotti in media tensione, i campi elettrici e magnetici prodotti dalla Punto di Raccolta “Piana della Fontana” e del collegamento in cavo AT interrato alla Stazione Elettrica 380/150 kV di Rotello sono riportati nel documento 04204 – Punto di Raccolta e Cavidotto AT – Relazione campi elettrici e magnetici.

2 QUADRO NORMATIVO

La normativa che regola l'esposizione della popolazione a campi elettromagnetici risale ai primi anni '90. La prima legge emanata, ora abrogata, è il DPCM 23 Aprile 1992 *“Limiti massimi di esposizione ai campi elettrico e magnetico generati alla frequenza industriale nominale (50 Hz) negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno”*: tale normativa fissava la distanza da mantenersi dagli elettrodotti aerei e i valori massimi di esposizione per la popolazione. Con il crescente interesse da parte della popolazione per la tematica in oggetto, è stata avvertita la necessità di una regolamentazione più dettagliata dell'esposizione ai campi elettrici e magnetici, cui ha fatto seguito l'emanazione di numerose leggi regionali e della legge quadro nazionale.

In particolare la Legge Quadro No. 36 del 22 Febbraio 2001 *“Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici”* ha lo scopo di assicurare la tutela della salute dei lavoratori, delle lavoratrici e della popolazione dagli effetti dell'esposizione a determinati livelli di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici e di assicurare la tutela dell'ambiente e del paesaggio promuovendo l'innovazione tecnologica. Con i successivi decreti attuativi, DPCM 8 Luglio 2003, sono stati fissati i livelli di esposizione, di attenzione e l'obiettivo di qualità da rispettarsi al fine della tutela della salute della popolazione.

Nella tabella 3 seguente riportiamo i valori fissati come limite di esposizione, valore di attenzione e obiettivo di qualità per campi elettrici e magnetici prodotti alla frequenza di rete (50 Hz) connessi al funzionamento e all'esercizio degli elettrodotti.

	Campo magnetico (μT)	Campo elettrico (V/m)	NOTE
Limite di esposizione	100	5000	-
Valore di attenzione	10	-	Da verificarsi in luoghi adibiti a permanenza non inferiore alle 4 ore
Obiettivo di qualità	3	-	

Tabella 3 - valori come da normativa in vigore

Con il DM del 29 Maggio 2008 "Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti" viene approvata la metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti, in relazione a quanto previsto dal DPCM 8 Luglio 2003: uno degli scopi è la regolamentazione delle nuove installazioni e/o nuovi insediamenti presso elettrodotti o edifici esistenti. A tal fine occorre approntare i corretti strumenti di pianificazione territoriale come la previsione di fasce di rispetto, calcolate sulla base di parametri certi e stabili nel lungo periodo. Le fasce di rispetto sono infatti definite come "lo spazio circostante un elettrodotto, che comprende tutti i punti, al di sopra e al di sotto del livello del suolo, caratterizzati da un'induzione magnetica di intensità maggiore o uguale all'obiettivo di qualità: all'interno delle fasce di rispetto non è consentita alcuna destinazione di edifici ad uso residenziale scolastico sanitario ovvero ad uso che comporti una permanenza non inferiore a quattro ore giorno". Tali fasce di rispetto sono variabili in funzione ai dati caratteristici di ogni tratta o campata considerata in relazione ai dati caratteristici della stessa. Al fine di facilitare la gestione territoriale è stato introdotto il concetto di **Distanza di Prima Approssimazione (Dpa)** quale: "la distanza, in pianta sul livello del suolo, dalla proiezione del centro linea, che garantisce che ogni punto la cui proiezione al suolo disti dalla proiezione del centro linea più di Dpa si trovi all'esterno delle fasce di rispetto".

La metodologia definita si applica alle linee elettriche aeree e interrate, esistenti o in progetto, **con esclusione delle linee a media tensione in cavo cordato ad elica**, siano esse interrate o aeree, in quanto in questi casi le fasce associabili hanno ampiezza ridotta, **inferiore alle distanze previste dal Decreto Interministeriale 21 Marzo 1988, No. 449 e del DMLPP del 16 Gennaio 1991**. Nella normativa viene specificato inoltre che, per le stazioni primarie, la Dpa - e quindi la fascia di rispetto - solitamente rientrano nei confini dell'area di pertinenza dell'impianto stesso. Comunque, nel caso l'autorità competente lo ritenga necessario, dovranno essere calcolate le fasce di rispetto relativamente agli elementi perimetrali (es. portali, sbarre, ecc.)

Al fine di stimare il campo elettrico e magnetico prodotto dagli elementi di rete e determinare le Dpa da applicarle, sono state prese in considerazione le "Linee Guida per l'applicazione del punto 5.1.3 dell'allegato al DM 29/05/2008" elaborate da Enel ad uso pubblico, "al fine di semplificare ed uniformare l'approccio al calcolo della Distanza di Prima Approssimazione (procedimento semplificato per il calcolo della fascia di rispetto) dei propri impianti, fruibile sia da parte di privati in sede di realizzazione di nuovi insediamenti, che da parte degli organi di controllo in sede di verifica".

3 CALCOLO DEL CAMPO MAGNETICO

La rete elettrica nazionale, a cui i cavidotti in media tensione di collegamento tra l'impianto fotovoltaico "Rotello 52.7" e il punto di raccolta Piana della Fontana saranno connessi, è esercita alla frequenza di 50 Hz. A questa frequenza i campi elettrici e magnetici generati dall'elettrodotto stesso sono due fenomeni distinti, il primo proporzionale alla tensione della linea stessa, mentre il secondo proporzionale alla corrente che vi circola.

Non si procede con il calcolo dei livelli di campo elettrico dato che, per le tensioni in gioco, le sopra citate linee guida specificano, a valle di misure e valutazioni effettuate sulle linee elettriche facenti parte della rete di Enel, che "il campo elettrico al suolo in prossimità di elettrodotti a tensione uguale o inferiore a 150 kV non supera mai il limite di esposizione per la popolazione pari a 5 kV/m".

Al fine di stimare il campo magnetico prodotto dai cavidotti in oggetto e determinare le Dpa da applicare, si è proceduto considerando prima le indicazioni fornite dalle "Linee Guida per l'applicazione del punto 5.1.3 dell'allegato al DM 29/05/2008" elaborate da Enel e poi effettuando il calcolo teorico sempre in considerazione di quanto previsto dal Decreto Ministeriale succitato.

È stato predisposto il calcolo teorico utilizzando la corrente massima che può transitare sull'elettrodotto come descritto nel capitolo seguente.

Il calcolo del campo magnetico è stato effettuato utilizzando il software "Magic" di BESHielding di cui riportiamo in allegato il documento di validazione. Il software permette di calcolare i campi magnetici generati da sorgenti di tipo elettrico, quali trasformatori, sistemi di linee elettriche, cabine MT/BT, buche giunti, blindosbarre e impianti elettrici. Il software permette la determinazione delle fasce di rispetto per linee elettriche e cabine MT/BT, secondo quanto previsto dalla Legge Quadro n. 36/2001 (esposizione ai campi magnetici della popolazione) e dal D.Lgs. n. 81/08 (valutazione dei rischi in ambiente lavorativo).

Permette inoltre di studiare le singole sorgenti (linee elettriche, cavi, sistemi multiconduttori, trasformatori) mediante configurazioni bidimensionali e tridimensionali attraverso l'integrazione della legge di Biot-Savart o lo studio di sistemi complessi, come le cabine elettriche MT/BT, tenendo conto della tridimensionalità delle sorgenti, della loro reale posizione e della sovrapposizione degli effetti delle diverse componenti.

3.1 Correnti di calcolo

I cavidotti saranno realizzati con conduttori in alluminio con sezioni rispettivamente 400, 630 e 185 mm² (diametro esterno complessivo rispettivamente di 50,5, 58,0 e 41,9 mm). I conduttori in alluminio di sezione 400, 630 e 185 mm² in posa interrata a trifoglio con terne affiancate ad una distanza minima di 250 mm, hanno una portata in corrente pari rispettivamente a 366, 553 e 247 A. Tale portata è superiore alla corrente che può essere prodotta dalle diverse aree dell'impianto fotovoltaico, pertanto a determinare la potata massima sarà la potenza degli impianti fotovoltaici

Si sottolinea di come la massima potenza dell'impianto fotovoltaico è raggiunta per poche ore all'anno, in condizioni di massimo irraggiamento, e pertanto questa condizione è ampiamente cautelativa.

Nel caso i medesimi elettrodotti dovessero essere funzionali ad un ulteriore impianto da realizzarsi ex-novo o a un ampliamento delle aree esistenti, questi saranno soggetti ad apposito procedimento di autorizzazione e in tale sede si verificheranno nuovamente le DpA associate all'aumento della corrente in transito.

Impianto	Cavidotto	Partenza	Arrivo	Potenza in transito (MVA)	km	Formazione	Corrente
ROTELLO 52.7	N1	Area 1 – Cabina MT/BT	Area 2 – SC-N	9,588	3,17	3x1x400	185 A
	W	Area 4 – SC-W	PR Piana della Fontana	9,180	5,09	3x1x400	177 A
	S	Area 10 – SC-S	PR Piana della Fontana	25,500	4,00	3x1x630	491 A
	E	Area 6 – SC-E	PR Piana della Fontana	8,568	2,86	3x1x185	185 A
	N	Area 2 - SC-N	PR Piana della Fontana	12,648	3,37	3x1x400	244 A
	E1	Area 7 – Cabina MT/BT	Area 6 – SC-E	3,264	1,52	3x1x185	63 A

Tabella 4

3.2 Risultati

I valori di campo magnetico generati dai cavidotti in media tensione sono calcolati al fine di definire le ampiezze delle Distanze di Prima Approssimazione (DPA) da applicarsi all'asse delle linee (dall'asse dello scavo). Tali valori sono desunti nell'ipotesi cautelativa che l'impianto fotovoltaico produca alla massima potenza.

Riportiamo nel seguito le mappe dei campi magnetici prodotti dai cinque cavidotti nelle varie tratte di percorso verso il punto di raccolta come descritte in Tabella 2. Le condizioni di posa sono quelle indicate all'interno del documento 14201 - Relazione generale elettrodotto MT.

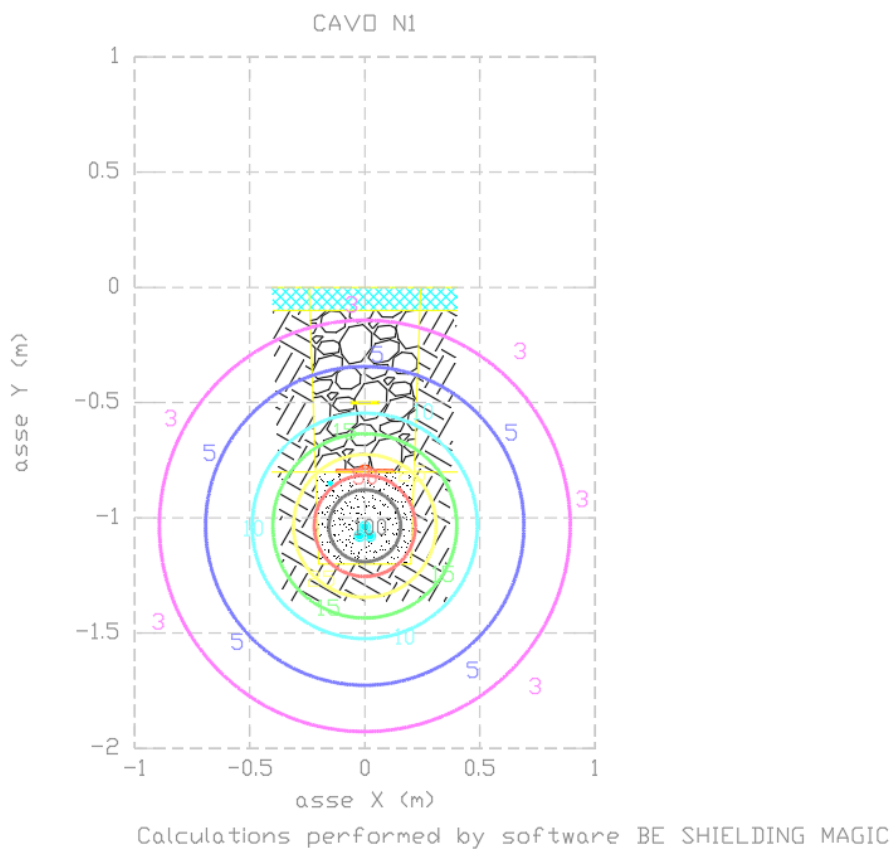


Figura 2 – Livelli di campo magnetico per la tratta 1

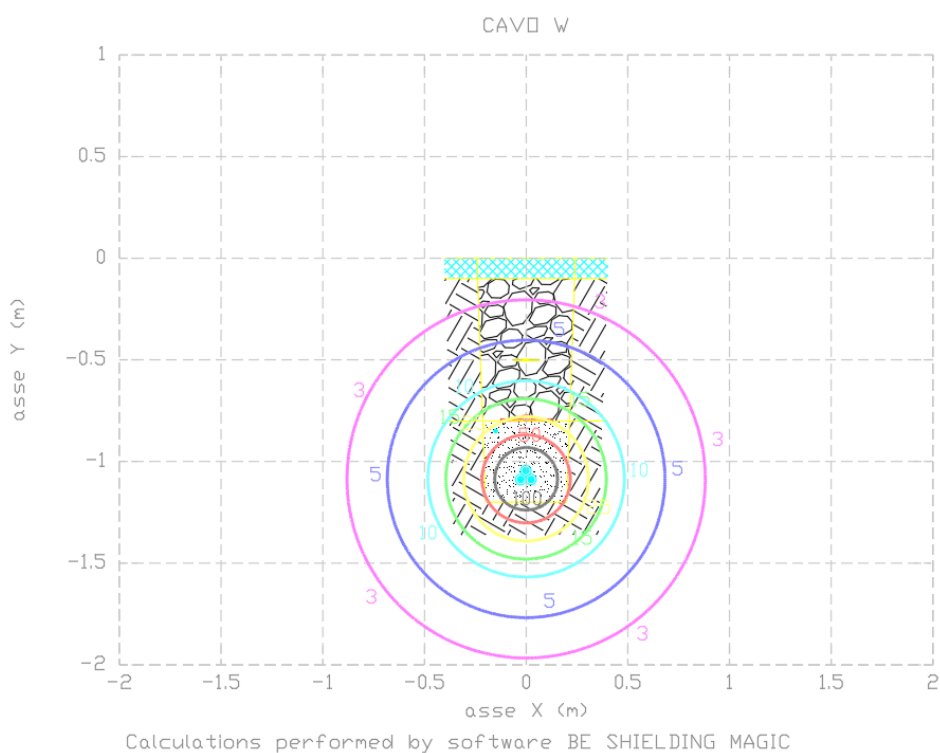


Figura 3 – Livelli di campo magnetico per la tratta 2

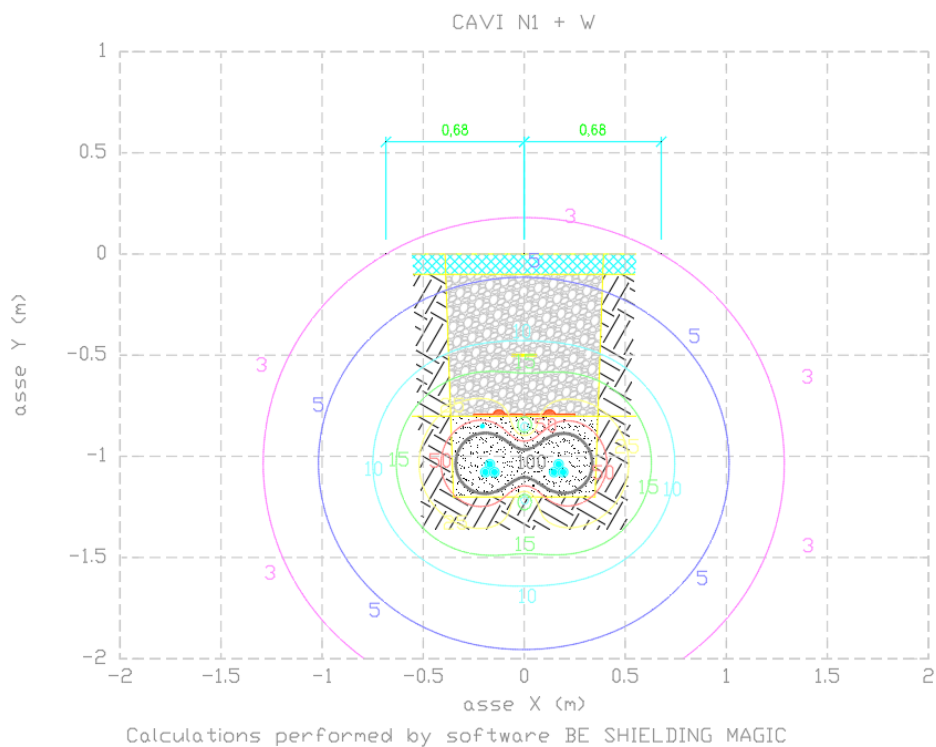


Figura 4 – Livelli di campo magnetico per la tratta 3

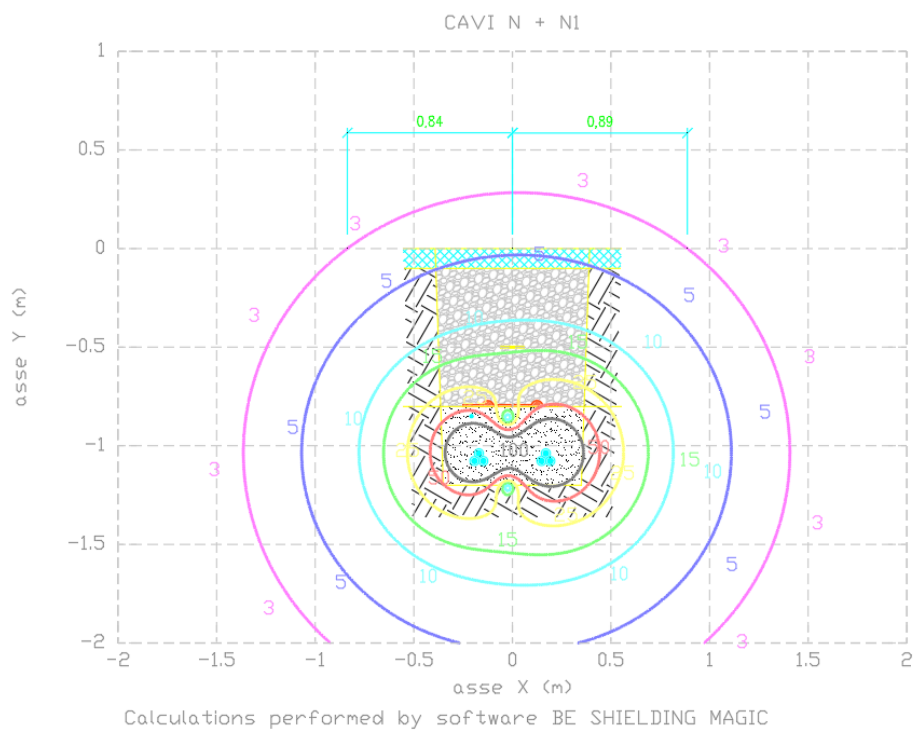


Figura 5 – Livelli di campo magnetico per la tratta 4

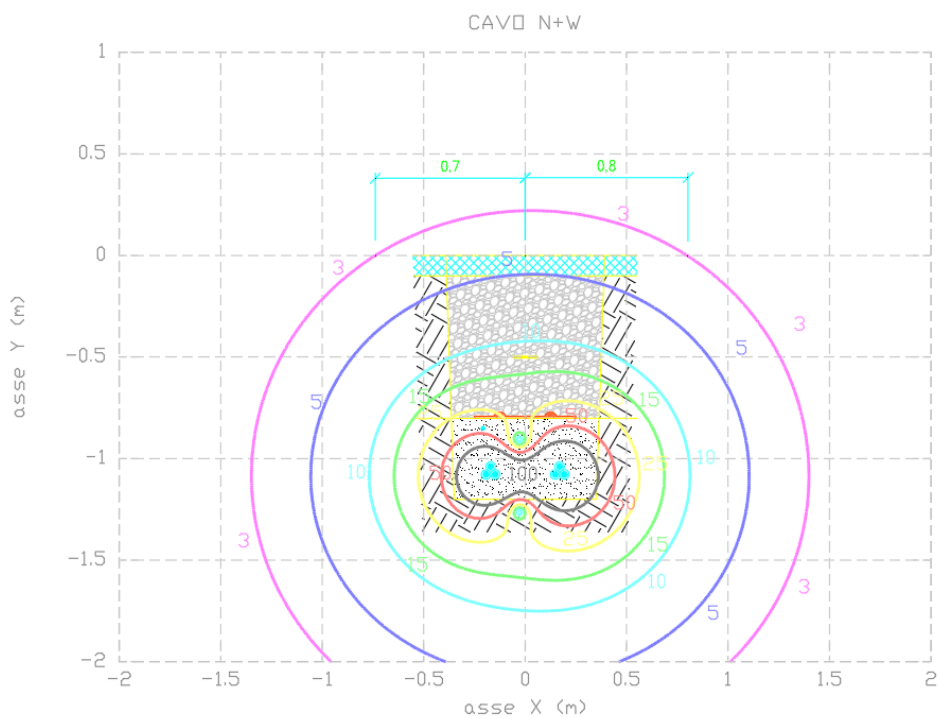


Figura 6 – Livelli di campo magnetico per la tratta 5

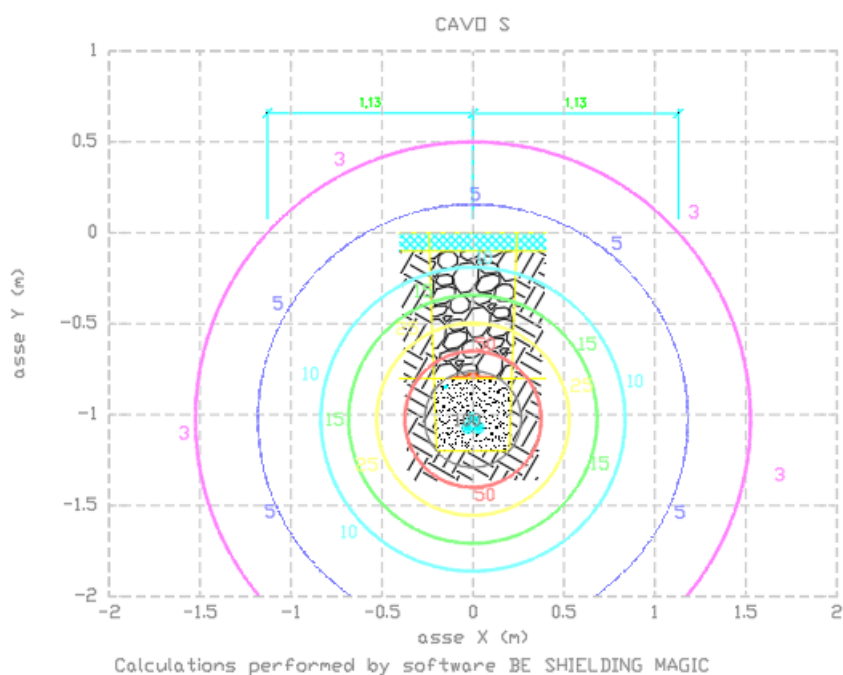


Figura 7 – Livelli di campo magnetico per la tratta 6

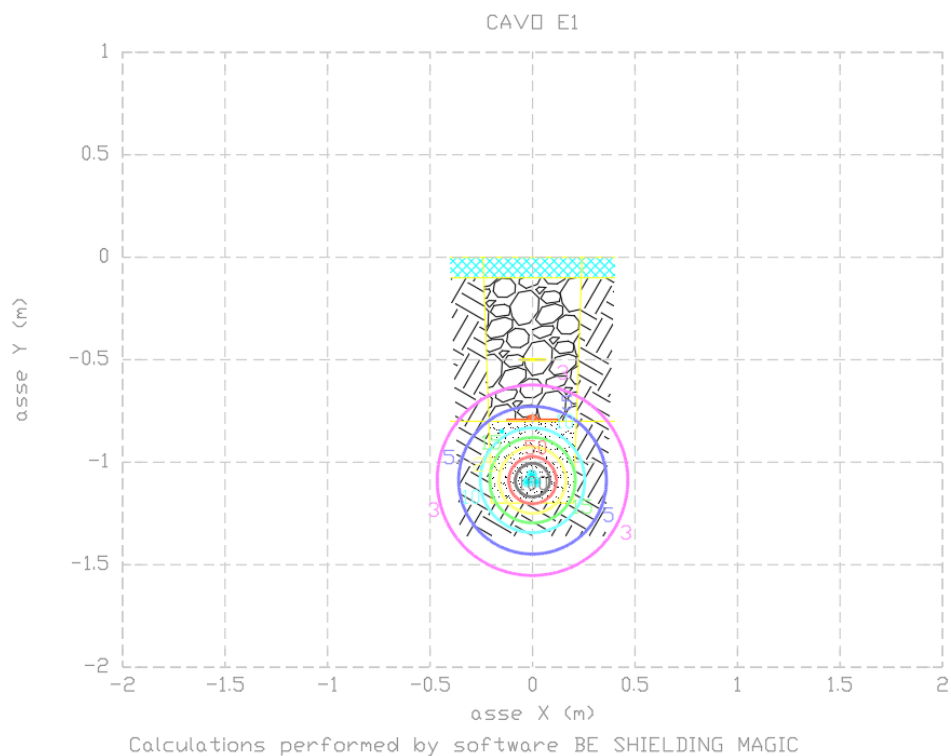


Figura 8 – Livelli di campo magnetico per la tratta 7

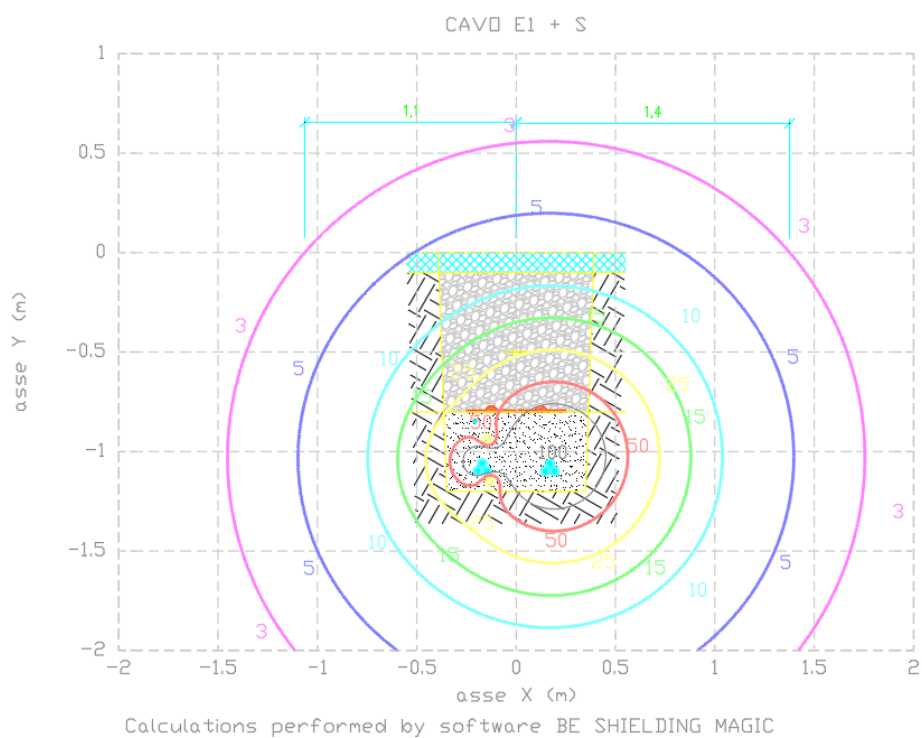


Figura 9 – Livelli di campo magnetico per la tratta 8

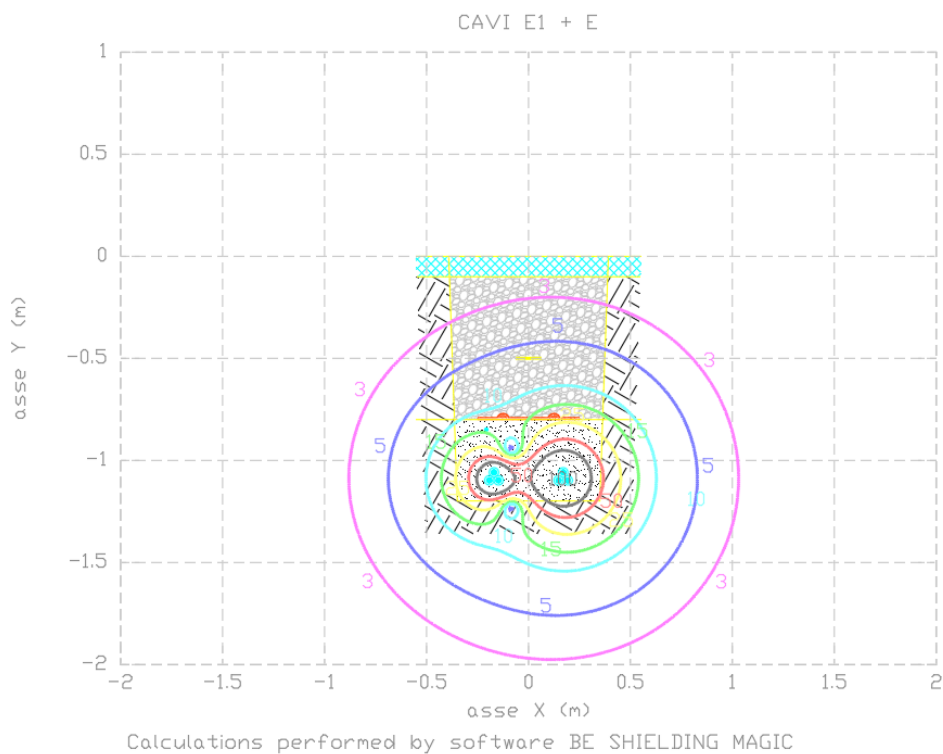


Figura 10 – Livelli di campo magnetico per la tratta 9

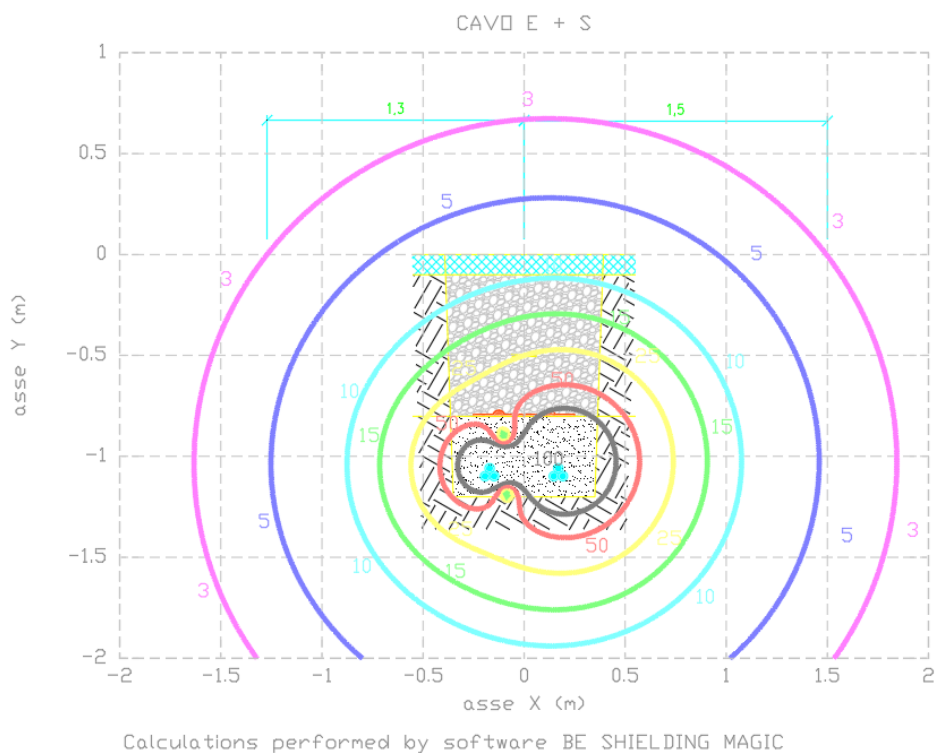
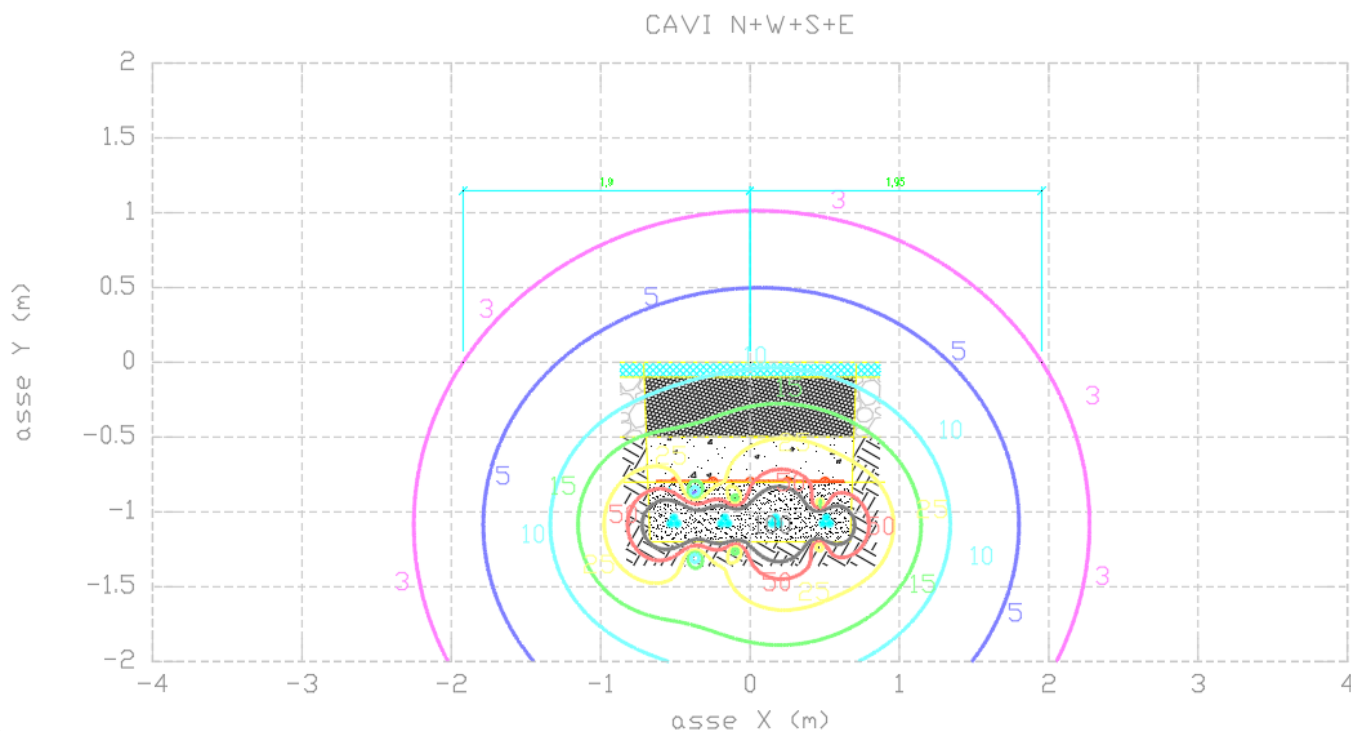


Figura 11 – Livelli di campo magnetico per la tratta 10



Calculations performed by software BE SHIELDING MAGIC

Figura 12 – Livelli di campo magnetico per la tratta 11

Le ampiezze delle Distanze di Prima Approssimazione (DPA) da applicarsi all'asse delle linee (dall'asse dello scavo), sono desunti nell'ipotesi cautelativa che l'impianto fotovoltaico produca alla massima potenza. I risultati delle simulazioni sopra riportate sono sintetizzati nella tabella 5 seguente:

Impianto	Tratta	Cavidotti	Dpa (m)
ROTELLO 52.7	1	N1	--
	2	W	-
	3	N1 + W	0,7
	4	N1 + N	0,9
	5	N + W	0,9
	6	S	1,1
	7	E1	-
	8	S + E1	1,4
	9	E + E1	-
	10	S + E	1,5
	11	N + W + S + E	1,95

Tabella 5

Le Dpa da applicare risultano pertanto pari rispettivamente a 1 m per le tratte 3, 4 e 5 e 2 m per le tratte 6, 8, 10 e 11. In riferimento alle tratte 1, 2, 7 e 9 non si applica nessuna Dpa.

 Reggio nell'Emilia - ITALIA	Progetto ROTELLO 52.7 Relazione campi elettrici e magnetici elettrodotto MT	Documento e revisione 14204B 13
4 CONCLUSIONI Il DPCM 8 Luglio 2003 fissa i limiti di esposizione per la popolazione ai campi elettrici e magnetici generati da elettrodotti alla frequenza di rete (50Hz). Tali limiti sono pari a 100 μT, 10 μT e 3 μT rispettivamente come limite di esposizione, valore di attenzione e obiettivo di qualità: gli ultimi due sono validi per esposizioni superiori alle 4 ore / giorno. In base alla definizione del DM del 29 Maggio 2008, occorre applicare la Dpa alle stazioni elettriche, alle cabine primarie e secondarie e agli elettrodotti ad esse collegati. Oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dai cavidotti in media tensione funzionali alla connessione di un impianto fotovoltaico del produttore DS Italia 1 Srl, avente una potenza nominale di 55,69 MVA ed ubicato nel Comune di Rotello in Provincia di Campobasso. La connessione in media tensione sarà realizzata utilizzando quattro cavidotti principali ed uno secondario, come precedentemente descritti, che corrono interamente al di sotto di strade asfaltate o parzialmente asfaltate. Il percorso è suddiviso in nove tratte di cui l'ultima, comprendente i quattro cavidotti principali, raggiungerà la cabina utente 30/150 kV compresa nel punto di raccolta Piana della Fontana. Come stabilito dalla normativa per le linee in media tensione in cavo cordato a elica, in singola terna, non è necessario il calcolo del campo magnetico in quanto le Dpa che garantiscono il rispetto del valore di qualità di 3 μT sono inferiori alle distanze previste dal Decreto Interministeriale 21 Marzo 1988, No. 449 e del DMLLPP del 16 Gennaio 1991 che rappresentano le normative di riferimento per le distanze minime di sicurezza dagli elettrodotti. Come si evince dalle simulazioni effettuate per tutti i cavidotti che sono costituiti da una sola terna di conduttori unipolari posati a trifoglio (configurazione equivalente al cavo cordato a elica per quanto concerne il calcolo dei campi magnetici), il valore di qualità di 3 μT è rispettato o già al disotto del livello del terreno o al massimo a 1 m dall'asse dello stesso, le Dpa da applicare risultano pertanto inferiori alle distanze previste dal DM del 1991. Nelle tratte in cui gli elettrodotti risultano posati parallelamente nel medesimo scavo, dalle simulazioni effettuate, è emerso che occorre applicare una distanza di prima approssimazione di 1 metro per le tratte 3, 4 e 5 e 2 m per le tratte 6, 8, 10 e 11. In riferimento alle tratte 1, 2, 7 e 9 non si applica nessuna Dpa. Gli elettrodotti saranno interrati al di sotto delle strade asfaltate o sterrate esistenti; questo e il fatto che nella zona esistono solo alcune abitazioni isolate in prossimità delle Dpa, garantiscono che i ricettori sensibili ricadano all'esterno delle stesse. Le Dpa sono riportate nel documento 14221 - Piano particellare.		

Allegato 1: Documento di Validazione



Documento di Validazione

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

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

Sommario

Premessa.....	3
1 Verifica del modulo bidimensionale	3
1.1 Confronto con CEI 211-04.....	3
1.2 Confronto con codice CESI	4
2 Verifica del modulo tridimensionale.....	7
2.1 Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato	7
2.2 Validazione sperimentale del modulo tridimensionale	8
3 Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza	9
3.1 Verifica del modello MAGIC della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method).....	9
3.2 Verifica del modello MAGIC del trasformatore completo con misure sperimentali	12
Conclusioni	13

Premessa

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

Il confronto si sviluppa in tre parti:

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

Le principali caratteristiche del software MAGIC® sono:

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

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

1 Verifica del modulo bidimensionale

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

1.1 Confronto con CEI 211-04

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

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

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

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

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

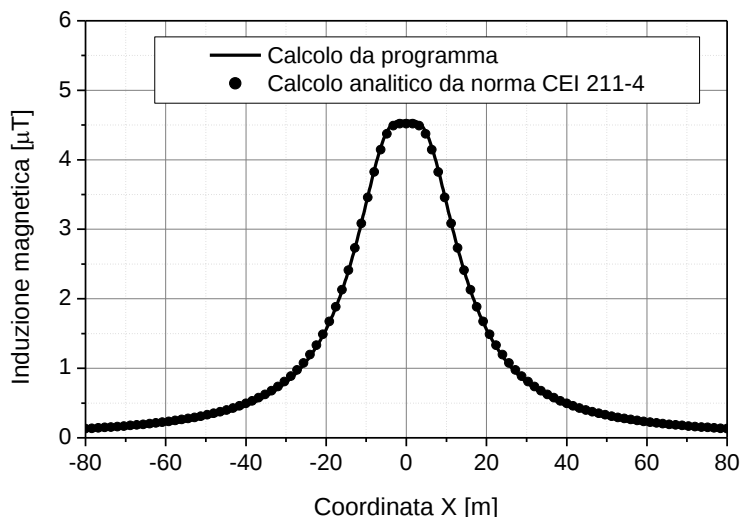


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

1.2 Confronto con codice CESI

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

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

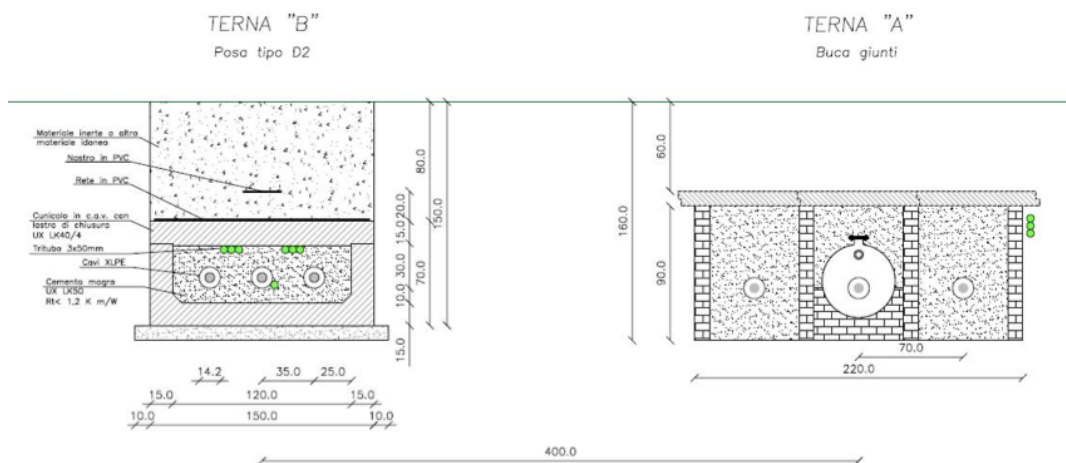


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

Condizioni di carico e relazioni di fase:

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

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

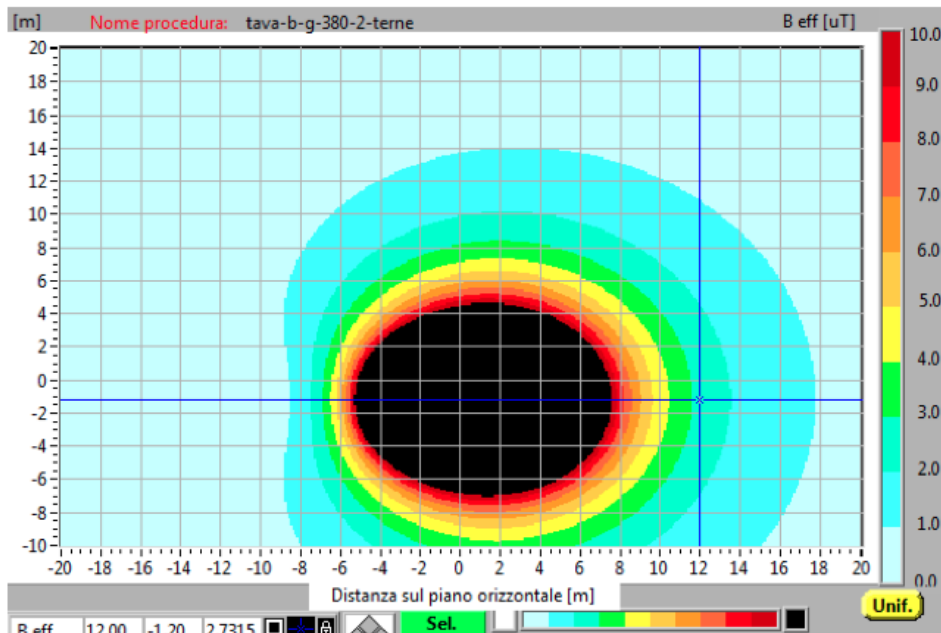


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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

- Terne parallele
- Multiconduttori 2D

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

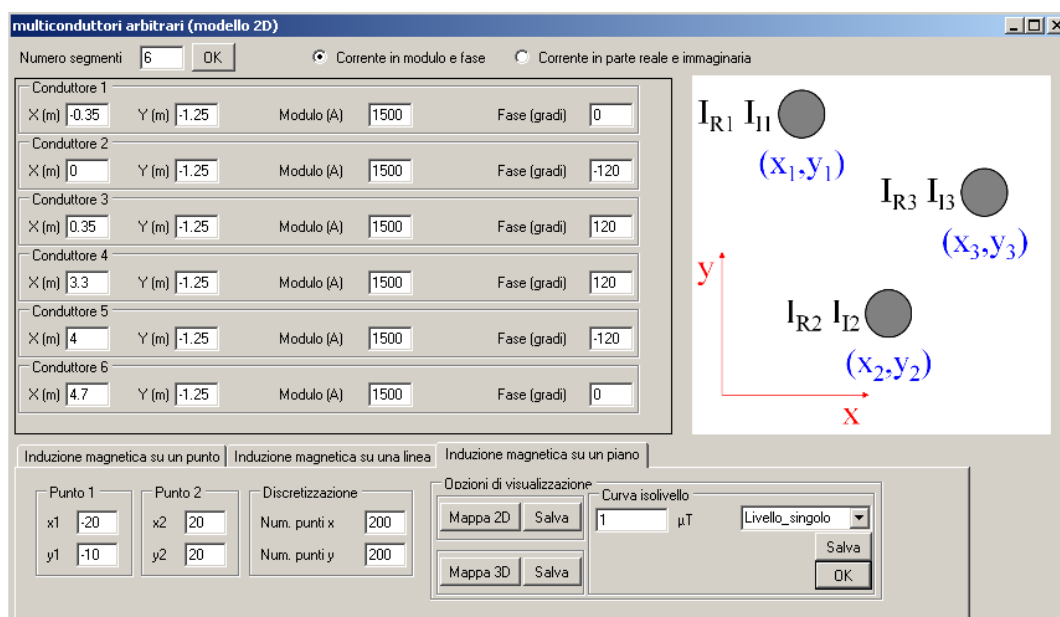


Figura 4:Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)””: dati definizione geometria e sorgenti

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

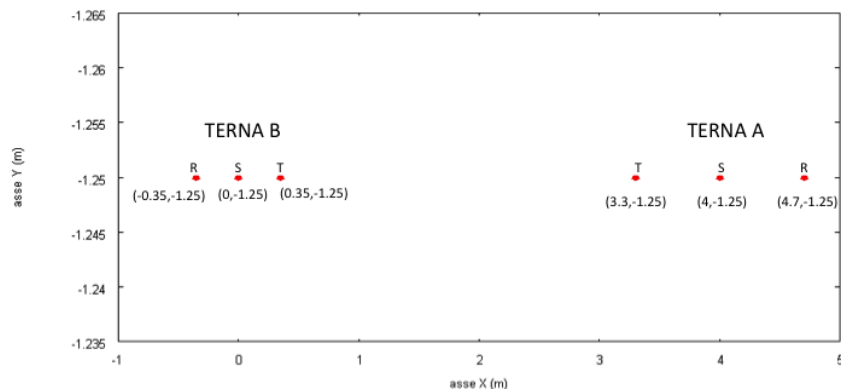


Figura 5: Geometria sorgenti

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

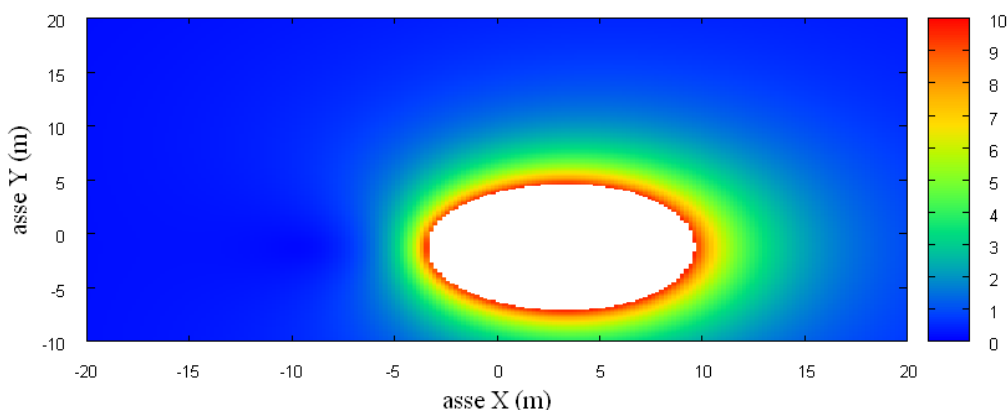


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

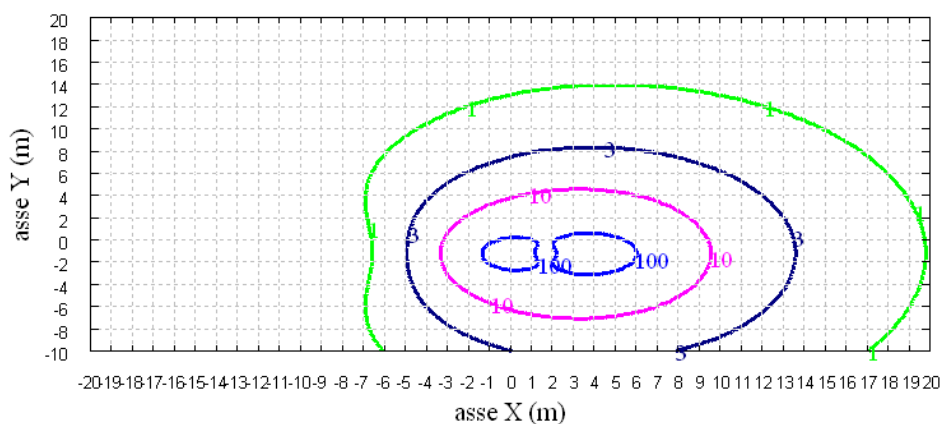


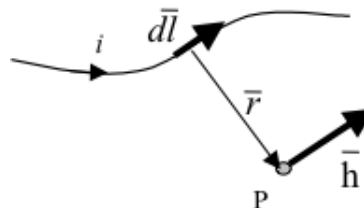
Fig. 7 Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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

2 Verifica del modulo tridimensionale

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

$$\vec{h} = \frac{1}{4\pi r^3} \oint \vec{dl} \times \vec{r}$$



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.

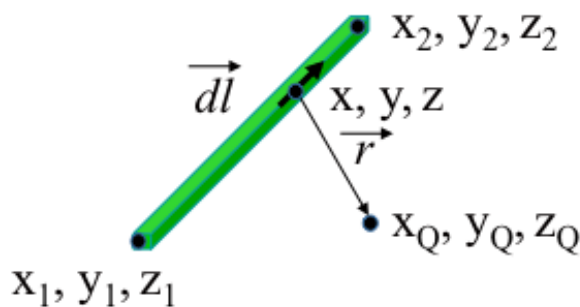


Fig. 8: Modello del segmento.

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

$$\vec{x} = x_1 + (x_2 - x_1)t$$

$$\vec{y} = y_1 + (y_2 - y_1)t$$

$$\vec{z} = z_1 + (z_2 - z_1)t$$

Si consideri inoltre che:

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

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

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

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

2.2 Validazione sperimentale del modulo tridimensionale

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

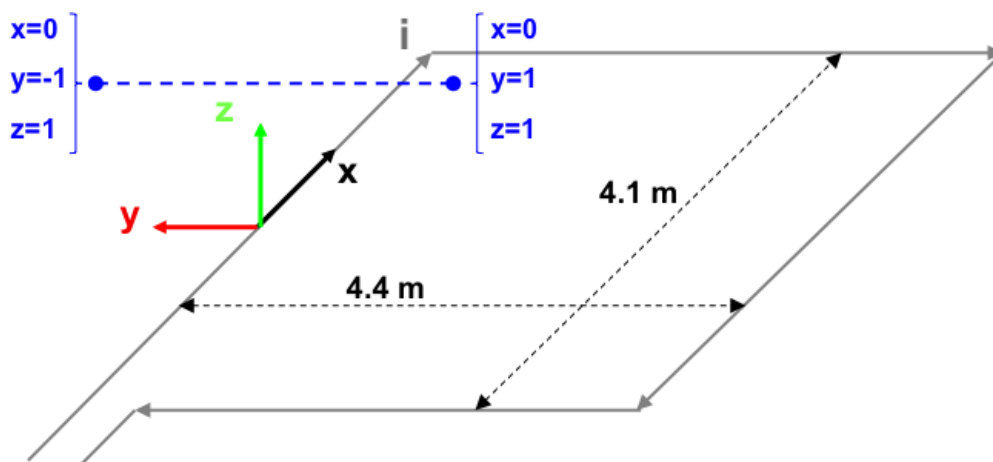


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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

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

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

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

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

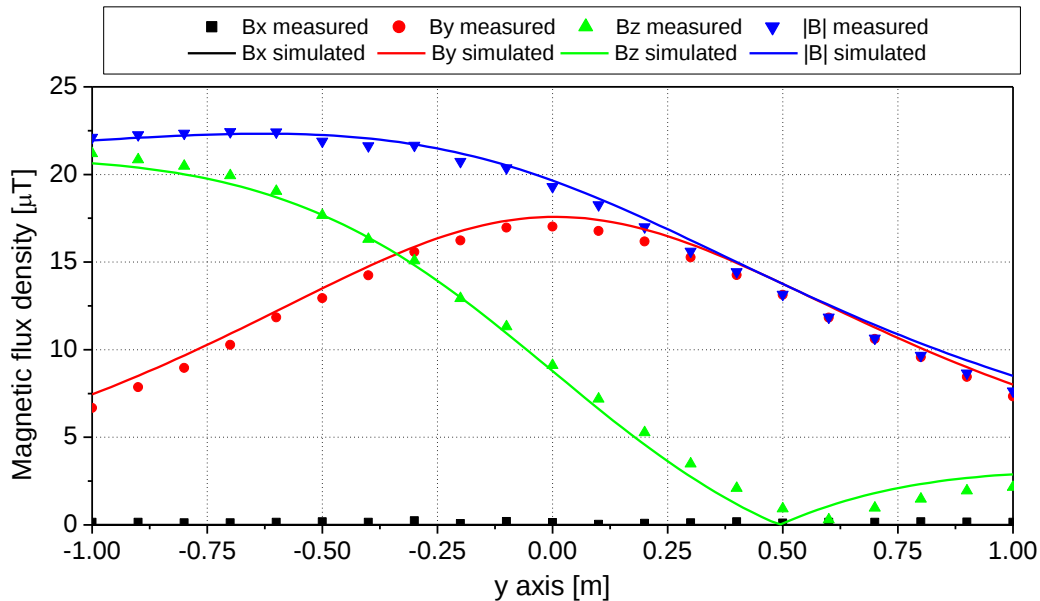


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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

3 Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza

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

La validazione è condotta in due step:

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

Maggiore dettaglio sui confronti sono riportati nella seguente referenza:

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

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

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

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

Nei calcoli che seguono i due avvolgimenti sono caratterizzati dalle stesse amperspire in opposizione ($N1 \cdot I1 = N2 \cdot I2$) e verranno considerate, come sorgenti, le correnti nominali.

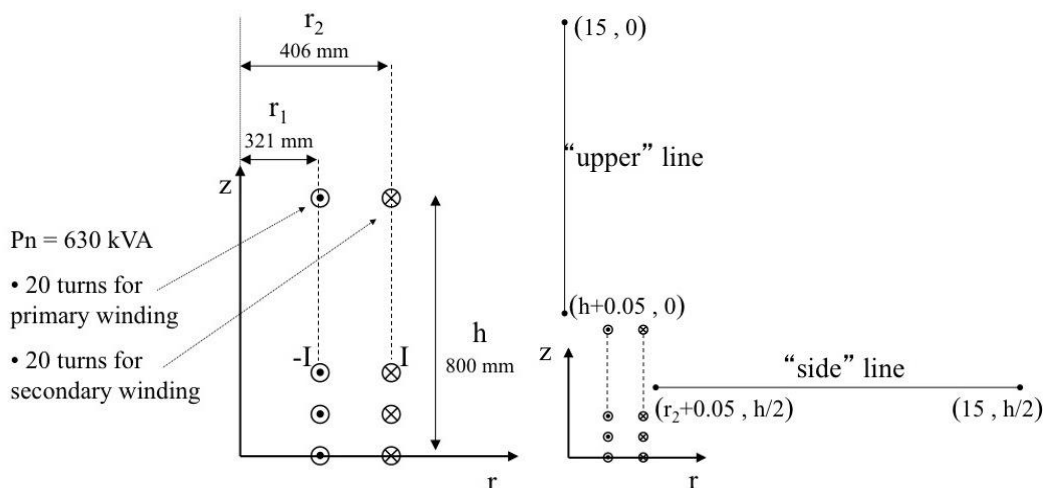


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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 è pertanto conveniente utilizzare il "modello 2" che risulta più accurato a spese di un maggiore peso computazionale (nell'ordine comunque delle decine di secondi).

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

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

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

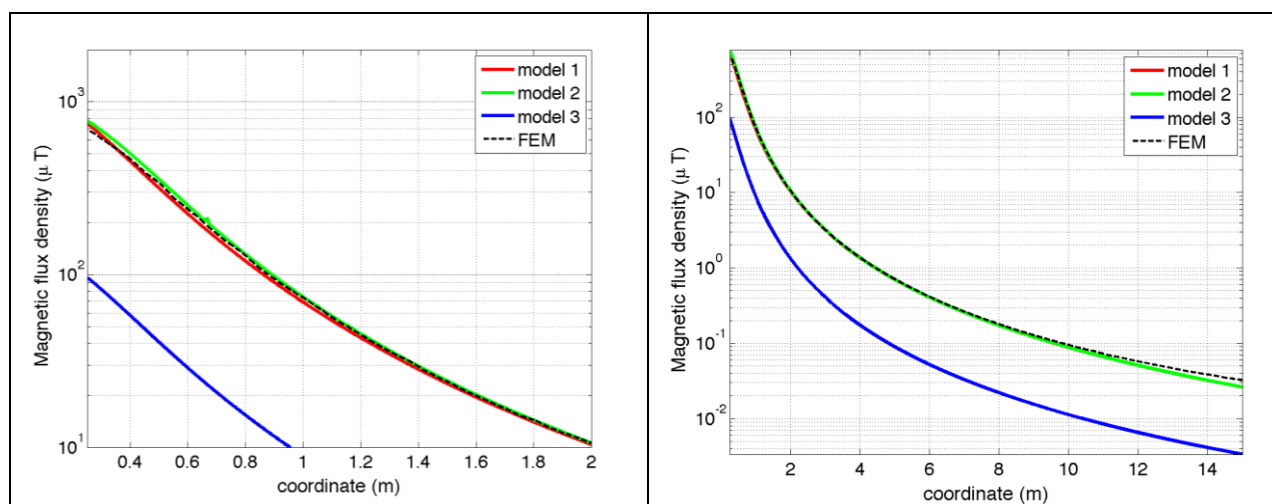


Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale

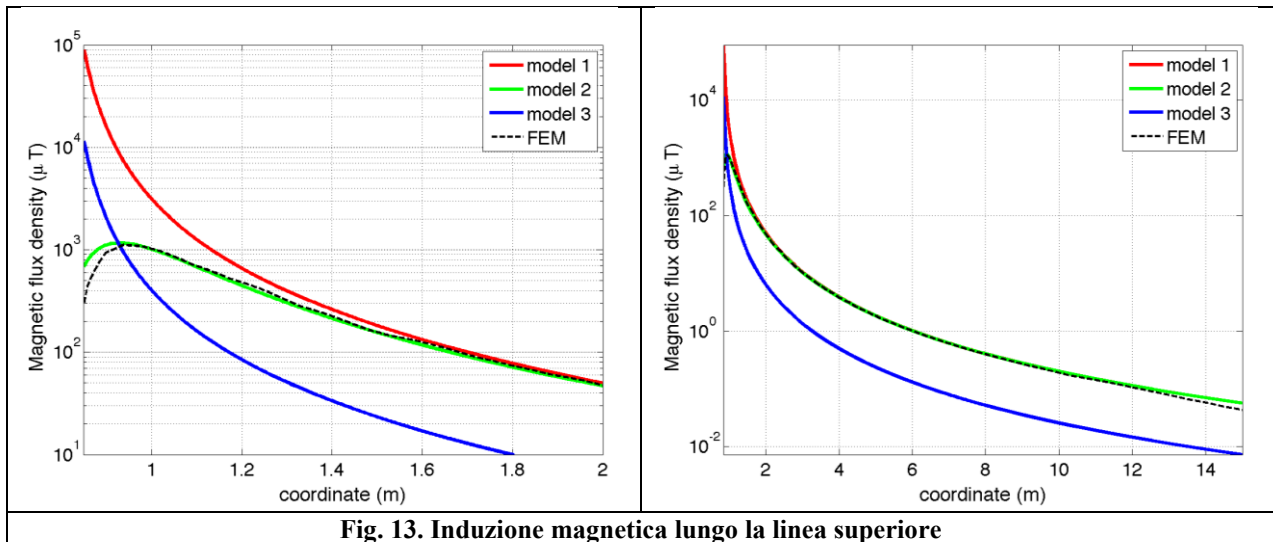


Fig. 13. Induzione magnetica lungo la linea superiore

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

3.2 Verifica del modello MAGIC del trasformatore completo con misure sperimentali

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

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

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

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

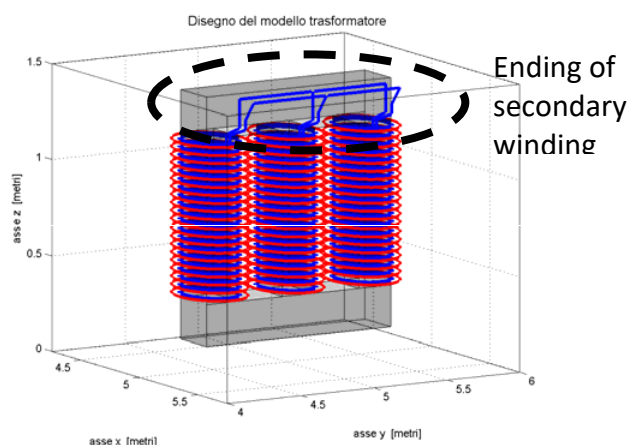


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate al lati BT.

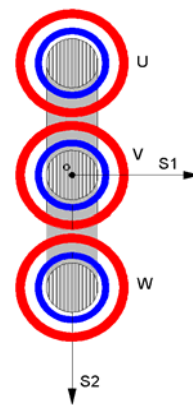


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

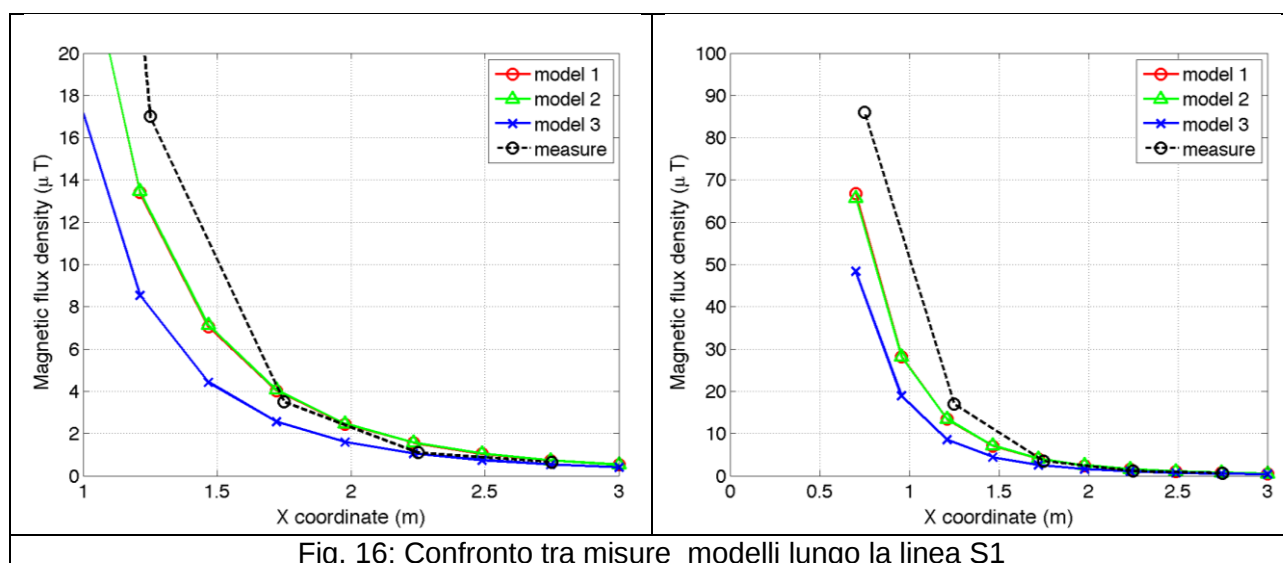
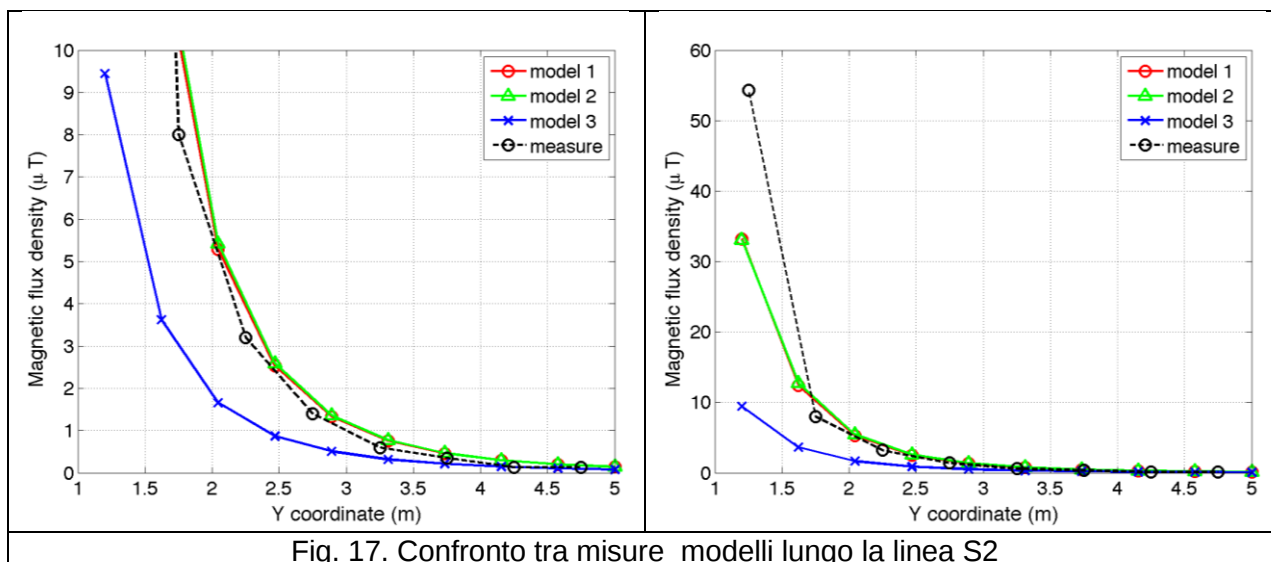


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1



Conclusioni

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

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

“...i modelli utilizzati devono essere descritti in termini di algoritmi implementati, condizioni al contorno e approssimazioni attuate. Essi devono essere validati attraverso misure o per confronto con modelli che abbiano subito analogo processo di verifica. La documentazione esplicativa e comprovante i criteri di cui sopra deve essere resa disponibile alle autorità competenti ai fini dei controlli”, può essere ritenuto idoneo allo scopo e, a tal fine, è stato redatto il presente documento.

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

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