



Gianluca Brugnioni

		<i>Bertani</i>	<i>Bolognesi</i>	<i>Brugnioni</i>	
C	26/08/22	Bertani	Bolognesi	Brugnioni	Revisione come da commenti Terna 4.8.2022
A	24/06/22	Bertani	Bolognesi	Brugnioni	Emissione per autorizzazione
REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE
COMMITTENTE 					IMPIANTO SE 380/132 kV FISCAGLIA
INGEGNERIA & COSTRUZIONI 					TITOLO RACCORDI 132kV RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI
SCALA	FORMATO	FOGLIO / DI		N. DOCUMENTO	
-	A4	1 / 28		4 6 7 0 4 B	

SOMMARIO

1	PREMESSA	3
2	QUADRO NORMATIVO	3
3	CALCOLO DEL CAMPO MAGNETICO.....	4
3.1	Descrizione dei raccordi in progetto.....	5
3.2	Correnti di calcolo.....	7
3.3	Risultati.....	8
3.4	Verifica dei valori limite e DPA.....	12
4	ANALISI DEI RICETTORI	13
5	CONCLUSIONI	14

1 PREMESSA

Oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici prodotti dai raccordi alla nuova SE 380/132 kV Fiscaglia dagli esistenti elettrodotti a 132 kV, attualmente afferenti alla CP Codigoro, nel dettaglio "CP Tresigallo – CP Codigoro", "CP Codigoro – CP Ariano", "CP Codigoro – CP Volania", e dei collegamenti alla CP Codigoro in doppia antenna.

L'opera in oggetto verrà realizzata, assieme alle altre indicate nel seguito e descritte nel dettaglio nella documentazione di progetto, per connettere alla rete elettrica nazionale diversi produttori di energia da fonte rinnovabile, fra i quali EG Dafne Srl, titolare di un progetto di impianto fotovoltaico ubicato nel Comune di Copparo (FE), EG Verde Srl per un impianto fotovoltaico ubicato nel Comune di Lajosanto (FE), EG Ambientale Srl, EG Flora Srl ed EG Sostenibilità Srl ciascuna per un diverso impianto fotovoltaico ubicato nel Comune di Codigoro (FE).

In base alle STMG accettate dalle società sopra menzionate, è necessaria la realizzazione di un punto di raccolta, la costruzione di una nuova stazione RTN 380/132 kV che si conatterà in entra esci alla linea in doppia terna 380 kV "Porto Tolle – Ravenna Canala" e alle linee ad oggi afferenti alla CP Codigoro.

La presente relazione tratta dei soli raccordi a 132 kV, denominati:

1. SE Fiscaglia – CP Tresigallo;
2. SE Fiscaglia – CP Ariano;
3. SE Fiscaglia – CP Volania;
4. SE Fiscaglia – CP Codigoro 1 (1° antenna);
5. SE Fiscaglia – CP Codigoro 2 (2° antenna).

Il calcolo dei campi elettrici e magnetici prodotti dalla SE Fiscaglia è riportato nel documento 46404; il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dai raccordi 380 kV è riportato nel documento 46604, mentre il calcolo dei campi generati dal punto di raccolta "Canale Bastione" e dal cavo a 132 kV di connessione alla SE Fiscaglia è riportato nel documento 46304.

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 1 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 (μ T)	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 1 - 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 DMLLPP 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 di cui i nuovi raccordi 132 kV tra la SE Fiscaglia, le linee esistenti e la CP Codigoro, faranno parte, 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 dagli elettrodotti in oggetto e determinare le Dpa da applicarle, 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) 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 Descrizione dei raccordi in progetto

Come precedentemente descritto e riportato nel documento 46432 – Corografia CTR, di cui riportiamo sotto uno stralcio, la connessione dei diversi impianti alimentati da fonti rinnovabili richiede la realizzazione di un punto di raccolta e di una nuova stazione elettrica 380/132 kV denominata “SE Fiscaglia”. Tale stazione sarà realizzata a poco meno di 700 metri dalla esistente Cabina Primaria di Codigoro a 132 kV e a circa 120 metri dalla esistente linea doppia terna a 380 kV “Porto Tolle - Ravenna Canala” a cui andrà a connettersi.

Data la vicinanza alla CP di Codigoro, in zona risultano presenti numerosi elettrodotti aerei ad essa afferenti a 132 kV, che tramite alcune modifiche andranno ad alimentare la nuova stazione.

I campi elettrici e magnetici generati della stazione a 380 kV e dei raccordi, sempre ad altissima tensione, non sono oggetto della presente relazione.

Il progetto dei raccordi a 132 kV alla nuova stazione prevede la realizzazione delle seguenti opere:

- Demolizione di un tratto dell'elettrodotto aereo “CP Codigoro -CP Volania” tra i pali 152 e 155 e realizzazione di 2 nuovi tralicci n. 152 A e 155 A; questi due tralicci saranno realizzati con pali gatto e avranno la funzione di realizzare il passaggio dell'elettrodotto da aereo a cavo; entrambi i cavi andranno poi a connettersi in stazione.
- Demolizione del primo tratto dell'elettrodotto aereo “CP Codigoro - CP Ariano” dal palo gatto fino in CP al palo n. 2 e realizzazione del raccordo alla SE Fiscaglia tramite elettrodotto aereo.
- Realizzazione del raccordo “SE Fiscaglia - CP Codigoro 1” mediante elettrodotto aereo che collega l'esistente connessione in cabina dell'elettrodotto “CP Ariano -CP Codigoro” alla SE Fiscaglia correndo parallelamente al nuovo tratto della linea “SE Fiscaglia - CP Ariano”
- Demolizione del tratto finale dell'elettrodotto aereo “CP Tresigallo – CP Codigoro”, dopo il palo n.147 e inserimento di un nuovo traliccio (n. 147A) di transizione tra aereo e cavo e realizzazione del raccordo in cavo tra il palo e la SE Fiscaglia.

Benché non rientri nelle opere di riassetto della rete a 132 kV oggetto della presente relazione, ai fini di stimare il campo magnetico complessivo prodotto, si tiene in considerazione anche la linea in cavo di connessione tra il punto di raccolta Canale Bastione e la SE Fiscaglia.

Tutti i cavidotti saranno realizzati con cavo AT con sezione pari a 1600 mm², i nuovi raccordi saranno realizzati con conduttori ACSR 31,5 mm. Tutte le linee esistenti sono armate con conduttore ACSR 22,8 mm e non è in progetto un loro ripotenziamento, pertanto per la sola campata di collegamento tra gli elettrodotti esistenti e i nuovi sostegni di transizione aereo-cavo verrà utilizzato un conduttore con sezione 22,8 mm.

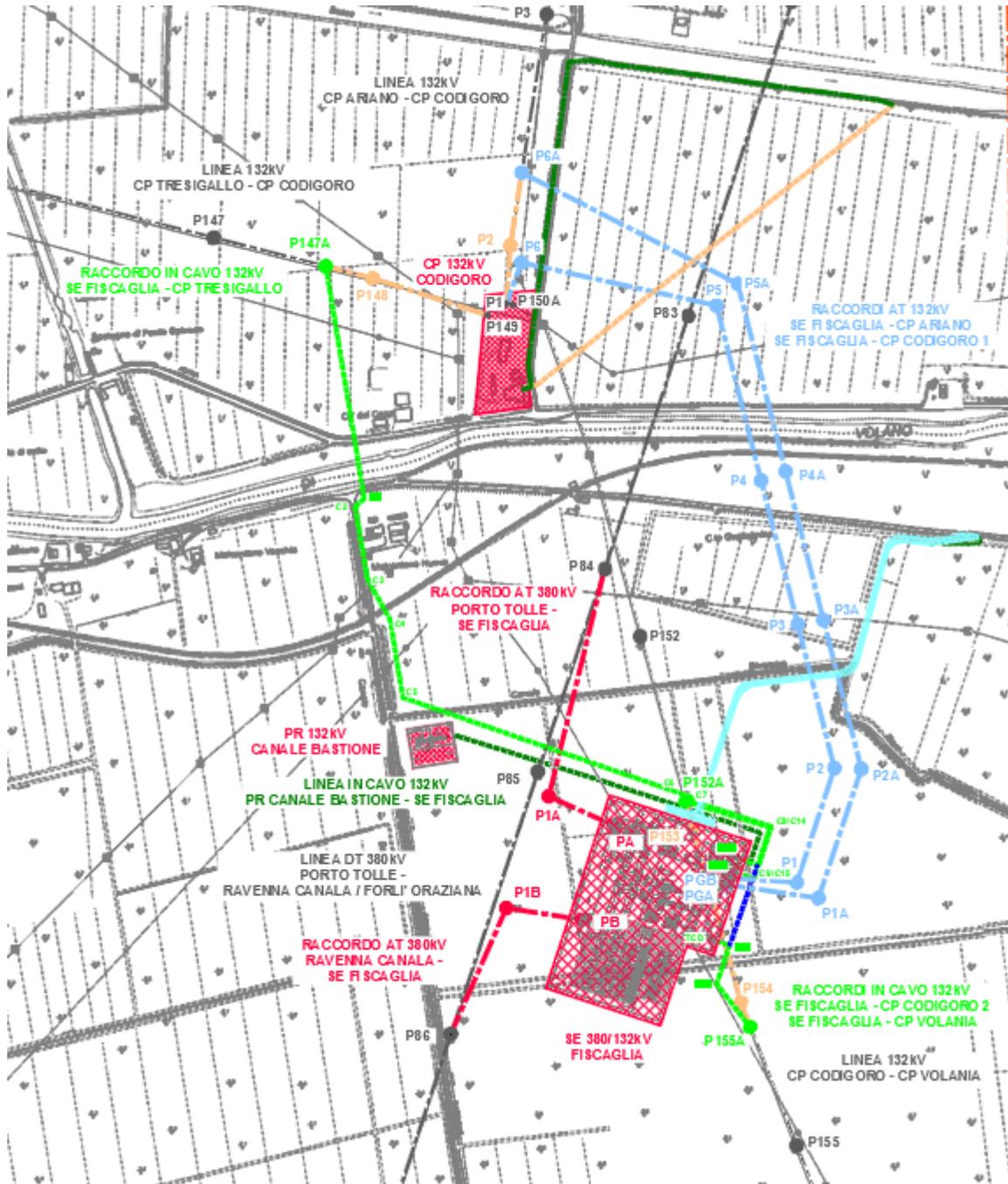


Figura 1: stralcio della planimetria con indicazione delle opere in progetto

3.2 Correnti di calcolo

Nel calcolo si è considerata la corrente corrispondente alla portata in servizio normale della linea definita dalla norma CEI 11-60 per conduttori con diametro 31,5 mm, conformemente al disposto del D.M. 29/05/2008, come indicato nella seguente tabella:

Tensione nominale della linea kV	Zona A		Zona B	
	Periodo C	Periodo F	Periodo C	Periodo F
132 ÷ 150	620	870	575	675

Tabella 2 – Valori di portata in corrente del conduttore di riferimento in zona A - B e periodo Caldo – Freddo come da CEI 11-60

L'elettrodotto in oggetto, essendo localizzato in provincia di Ferrara, al livello del mare rientra in zona B; pertanto la portata in corrente in servizio normale risulta pari a **675 A**. Secondo la medesima normativa il cavo di alluminio con sezione di 1600 mm², impiegato per alcuni tratti di elettrodotto, che descriveremo più in dettaglio in seguito, può portare fino a **1110 A**.

Come descritto le linee esistenti armate con conduttore ACSR 22,8 mm e non verranno ripotenziare, almeno in questa fase. Il conduttore ACSR 22,8 mm ha una portata di **445 A**. Per la sola campata di collegamento tra gli elettrodotti esistenti e i nuovi sostegni di transizione aereo-cavo ovvero di amarro con cambio conduttore aereo si è utilizzato il valore di **445 A** corrispondente alla portata del conduttore 22,8 mm attualmente installato.

Di seguito riportiamo la tabella di sintesi delle correnti utilizzate per il calcolo dei campi magnetici riferite ad ogni raccordo, suddiviso nelle diverse tratte:

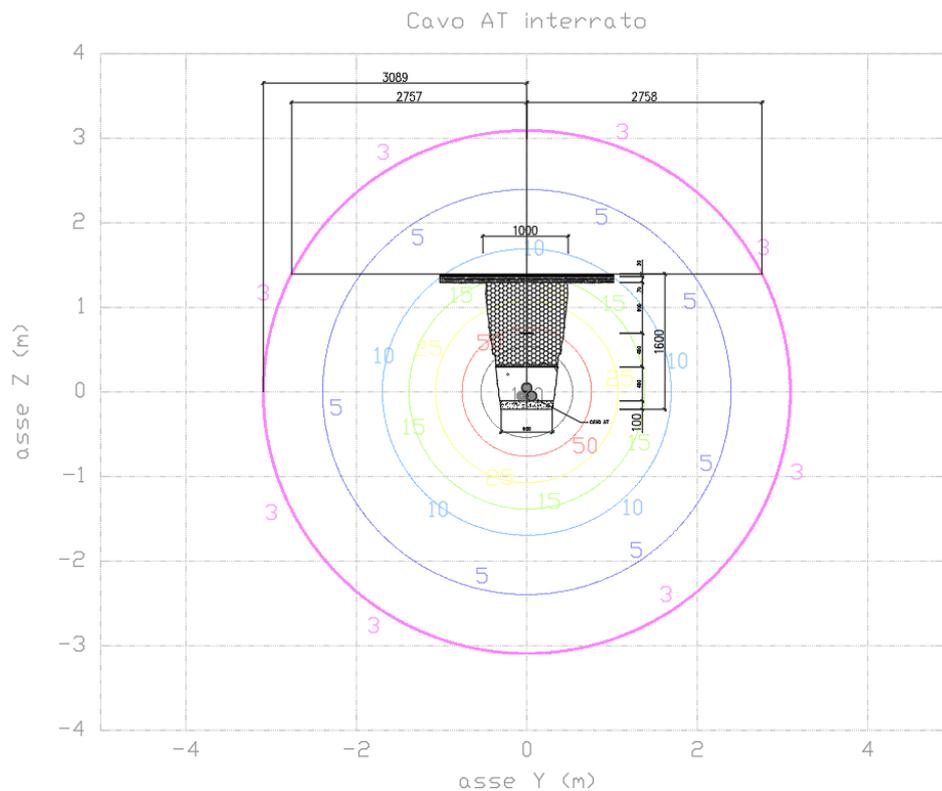
Raccordo 132kV	Nuovo tratto		Ultima campata tratto esistente	
	Conduttore	Portata	Conduttore	Portata
SE Fiscaglia – CP Tresigallo	Cavo 1600 mm ²	1110 A	ACSR 22,8 mm	445 A
SE Fiscaglia – CP Ariano	ACSR 31,5 mm	675 A	ACSR 22,8 mm	445 A
SE Fiscaglia – CP Volania	Cavo 1600 mm ²	1110 A	ACSR 22,8 mm	445 A
SE Fiscaglia – CP Codigoro 1	ACSR 31,5 mm	675 A	-	-
SE Fiscaglia – CP Codigoro 2	Cavo 1600 mm ²	1110 A	ACSR 22,8 mm	445 A

Tabella 3 - Sintesi delle correnti utilizzate per il calcolo dei campi magnetici

3.3 Risultati

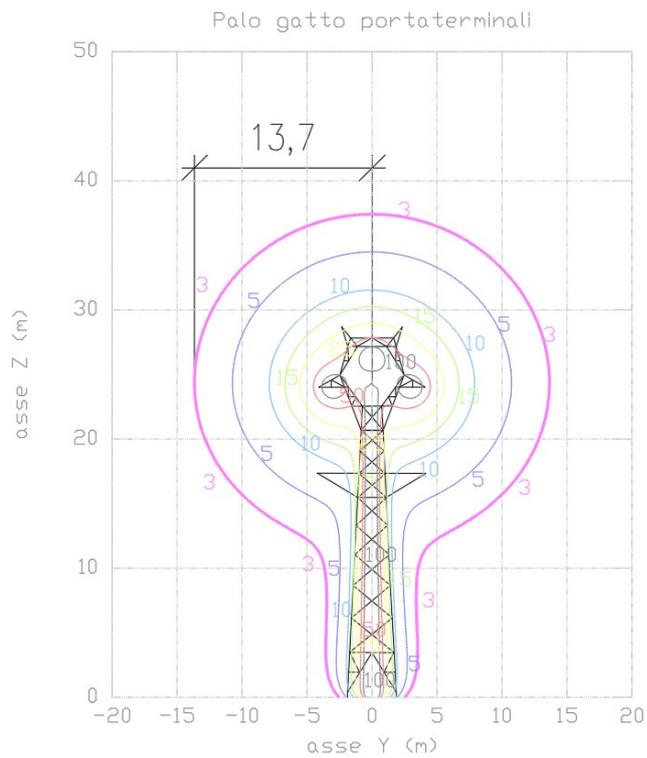
I valori di campo magnetico generati dagli elettrodotti sono calcolati al fine di definire le ampiezze delle distanze di prima approssimazione da applicarsi dall'asse elettrodotti stessi, siano essi aerei o interrati. Tali valori sono desunti utilizzando le correnti descritte nel capitolo precedente.

Riportiamo nel seguito i risultati delle simulazioni effettuate rispettivamente considerando i cavi AT interrati posati a trifoglio a una profondità di 1,5 m, i conduttori come disposti sul palo gatto, configurazione che corrisponde ai sostegni P147A, P152A, P155A, e con i conduttori disposti a triangolo come per tutti gli altri sostegni 132 kV, eccetto le situazioni di incrocio analizzate nel seguito. L'asse dei grafici coincide con l'asse dei sostegni.



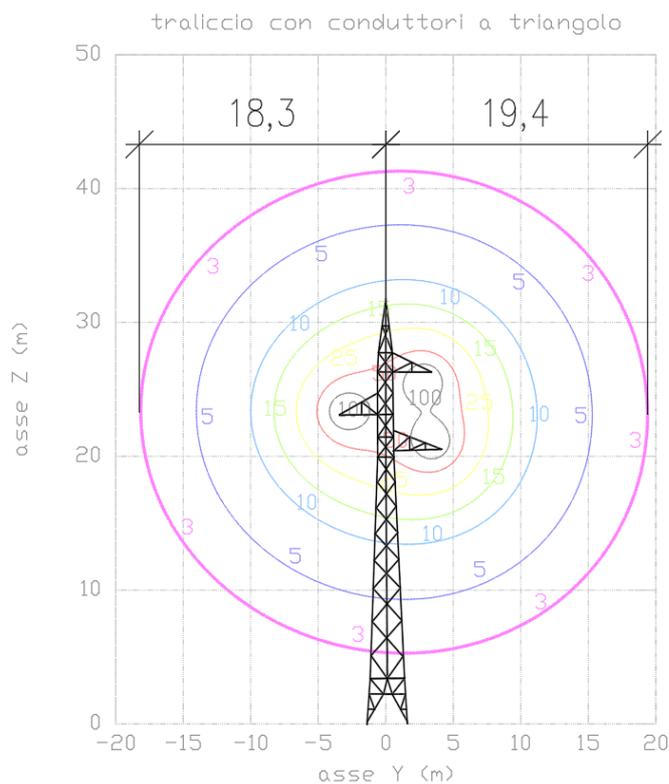
Calculations performed by software BE SHIELDING MAGIC

Figura 2 – Livelli di campo magnetico generati dal cavo AT interrato posato a trifoglio



Calculations performed by software BE SHIELDING MAGIC

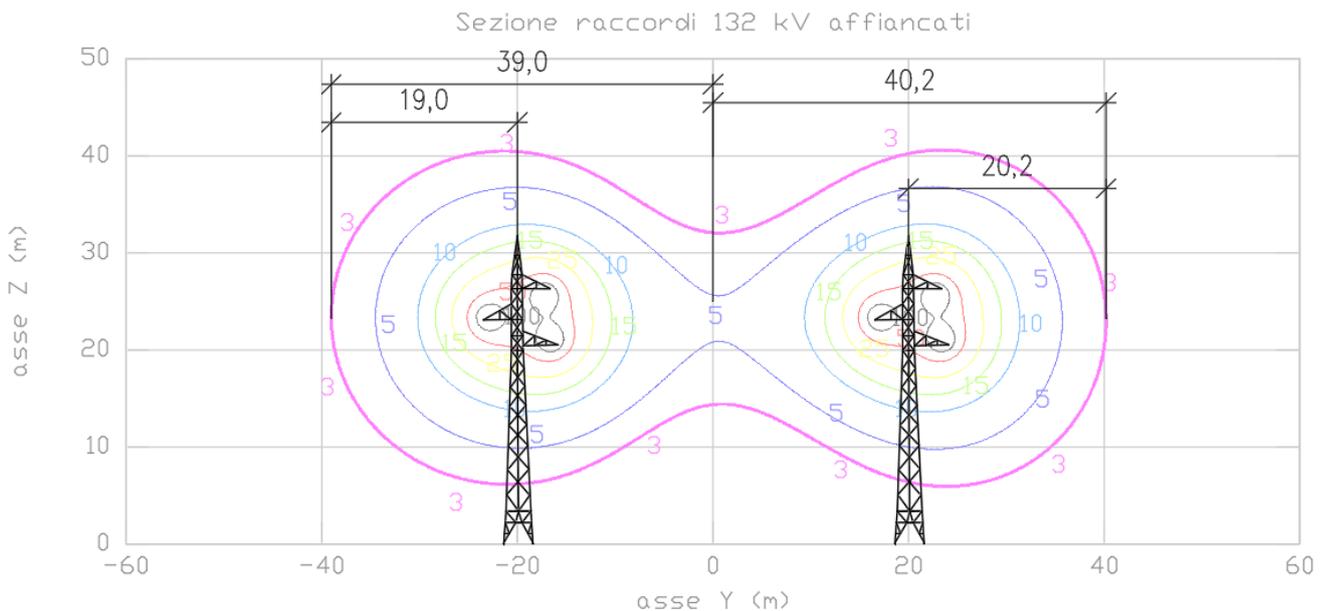
Figura 3 – Livelli di campo magnetico generato dai conduttori aerei e dal cavo come disposti sul palo gatto di transizione



Calculations performed by software BE SHIELDING MAGIC

Figura 4 – Livelli di campo magnetico generato dai conduttori aerei, con disposizione delle fasi a triangolo

Nei tre grafici precedenti sono rappresentati i campi magnetici generati dai diversi elettrodotto in configurazione standard. Essendo, come descritto, l'area già molto popolata da elettrodotto si verificano diverse situazioni di parallelismo o intersezione che meritano di essere valutati nel dettaglio. In particolare, nei grafici seguenti riportiamo i risultati ottenuti nelle situazioni di parallelismo tra elettrodotto aerei e tra cavidotto interrati.

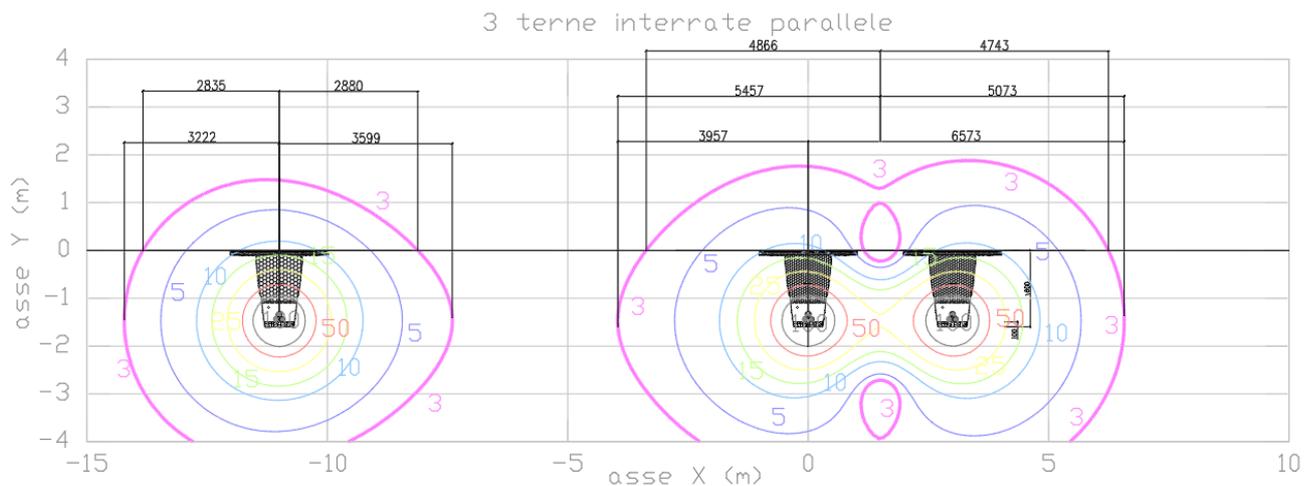


Calculations performed by software BE SHIELDING MAGIC

Figura 5 – Livelli di campo magnetico generato dai conduttori aerei, con disposizione delle fasi a triangolo nel tratto in cui viaggiano paralleli

Come si osserva dalla figura 5 il parallelismo tra gli elettrodotto genera una sovrapposizione delle DPA al centro tra le due linee: è possibile pertanto definire una unica DPA per i due elettrodotto pari a 41 metri dall'asse delle due linee.

Dalla figura 6 è invece possibile vedere che la distanza di 11 metri tra la posa del cavidotto di collegamento tra il punto di raccolta e la SE Fiscaglia e i due elettrodotto in cavo facenti parte della "SE-Fiscaglia - Codigoro 2" e "SE Fiscaglia - Ariano" fa sì che entrambi risentano marginalmente della loro mutua presenza. La fascia del cavo alla distanza di 11 metri (non oggetto di questa relazione) rimane comunque di 3 metri al livello del suolo. La DPA dei due cavi posti ad un interasse di 3 metri l'uno dall'altro diviene di 5 metri dall'asse degli stessi (poco maggiore dei 3 metri dall'asse dell'elettrodotto stesso).



Calculations performed by software BE SHIELDING MAGIC

Figura 6 – Livelli di campo magnetico generato dai 3 cavi interrati posati parallelamente (comprensivi del cavo di connessione al punto di raccolta)

Successivamente vengono prese in considerazione gli incroci tra i diversi elettrodotti, in particolare viene valutato l'incrocio tra gli elettrodotti "SE Fiscaglia - CP Codigoro 1" e "SE Fiscaglia - CP Ariano" e l'elettrodotto esistente a 380 kV doppia terna "Porto Tolle - Ravenna Canala/Forlì Oraziana". Il passaggio delle linee a 132 kV sotto l'elettrodotto a 380 kV viene effettuato utilizzando dei sostegni "E asterisco" (corrispondenti ai pali P5, P5A e P6A).

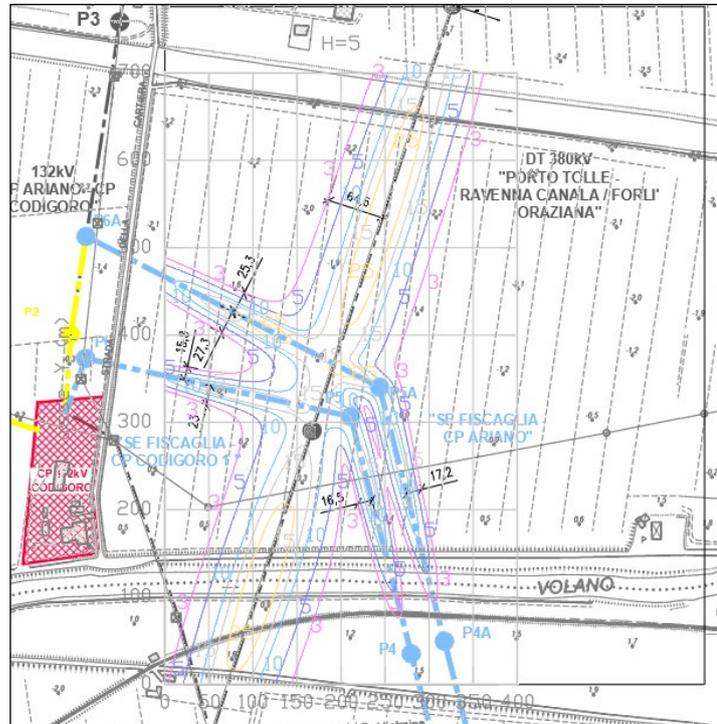


Figura 7 – Livelli di campo magnetico generato nell'intersezione tra le linee aeree 380kV e le linee interrate 132 kV a 5 mslm

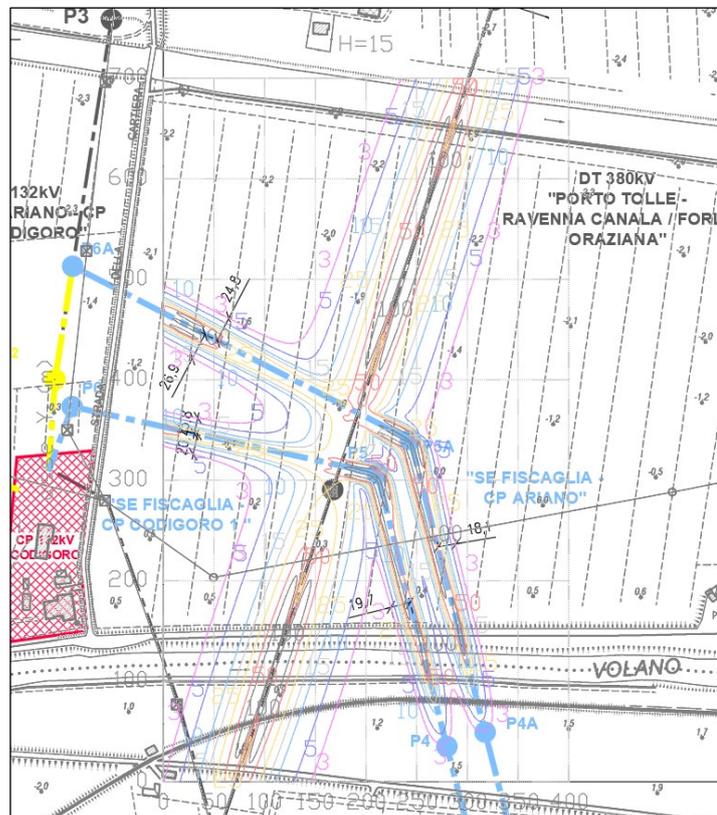


Figura 8 – Livelli di campo magnetico generato nell'intersezione tra le linee aeree 380kV e le linee interrate 132 kV a 15 mslm

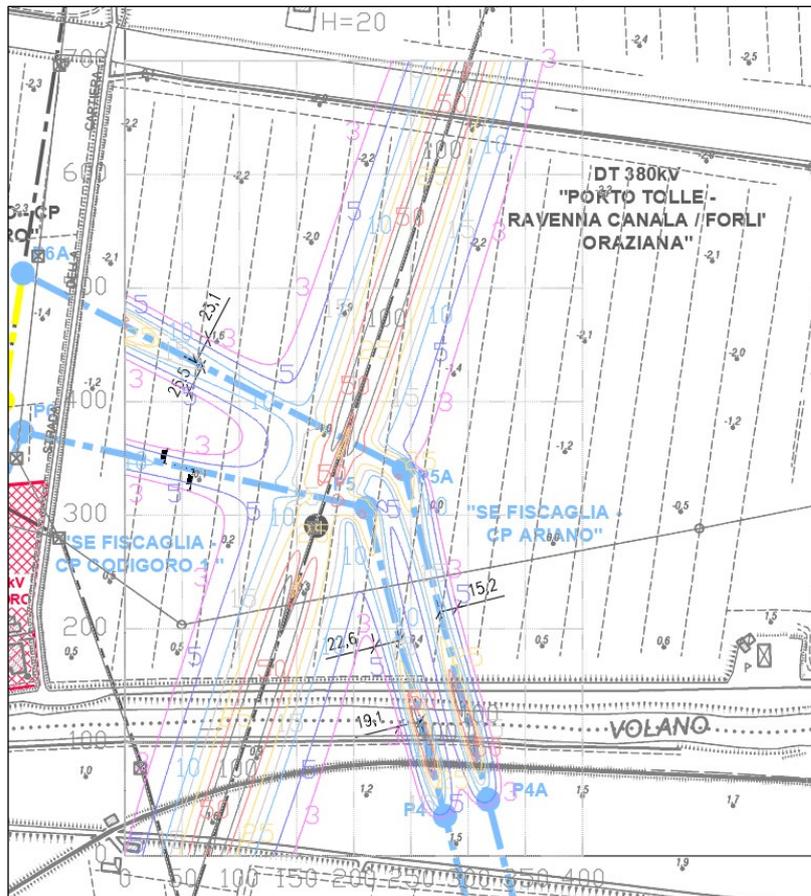


Figura 9 – Livelli di campo magnetico generato nell'intersezione tra le linee aeree 380kV e le linee interrato 132 kV a 20 mslm

3.4 Verifica dei valori limite e DPA

Nelle figure 2 e 6 è riportato l'andamento dell'intensità del campo magnetico in prossimità dei cavidotti interrati. Nelle figure 3, 4 e 5 è riportato l'andamento delle intensità del campo magnetico generati dalle diverse configurazioni di tralici presenti negli elettrodotti aerei. Dai grafici si può vedere che in nessun caso il campo magnetico generato dai conduttori raggiunge, al suolo, valori superiori al limite di esposizione per la popolazione di $100 \mu\text{T}$: tale valore viene raggiunto solo in vicinanza dei conduttori stessi dove è ben più grave il rischio di elettrocuzione.

Dai medesimi grafici si possono ricavare le ampiezze delle fasce di rispetto del valore di qualità di $3 \mu\text{T}$, che riportiamo nella tabella sottostante, arrotondate per eccesso al metro, come previsto dalla norma.

DPA dall'asse della linea			DPA riportate dalle Linee Guida con corrente di calcolo pari a 675A	
Configurazione	lato sx (m)	lato dx (m)	lato sx (m)	lato dx (m)
cavo interrato	3	3	3,1	3,1
2 linee in cavo interasse 3 metri	5	5	--	--
palo gatto	14	14	17	17
triangolo	20	20	20	20
2 linee parallele interasse a 40 m	40	41	--	--

Tabella 4 - Sintesi delle correnti utilizzate per il calcolo dei campi magnetici

Le ultime due colonne a destra della tabella riportano la fascia di rispetto del valore di qualità di $3 \mu\text{T}$ prevista dalle "Linee Guida per l'applicazione del punto 5.1.3 dell'allegato al DM 29/05/2008" elaborate da Enel. La DPA del cavo è individuata senza considerare la profondità di interrimento dell'elettrodotto.

Nello spirito cautelativo di definizione delle DPA si applica la fascia di rispetto maggiore, per ciascun elettrodotto, quindi:

- 20 m per le linee a 132 kV a singola terna aeree;
- 41 m dall'asse degli elettrodotti in caso di parallelismo a distanza di 40m (21m dall'asse dell'elettrodotto);
- 28 m per la tratta dell'elettrodotto "SE Fiscaglia - CP Ariano" tra i tralicci P6A-P5A
- 25 m – lato sud per la tratta dell'elettrodotto "SE Fiscaglia - CP Codigoro 1" tra i pali P5 e P4
- 3 m dagli elettrodotti in cavo
- 5 metri dall'asse degli elettrodotti posati ad un interasse di 3 metri

4 ANALISI DEI RICETTORI

L'unico ricettore esistente nell'area oggetto di interventi è posto in prossimità del ramo del Po di Volano dal lato opposto alla esistente CP Codigoro.

Il ricettore è posto in prossimità del percorso del raccordo tra l'esistente "Cp Tresigallo – CP Codigoro" e la SE Fiscaglia. Tale raccordo, al fine di evitare di caricare ulteriormente l'impatto sull'area naturalistica ZPS "Garzaia dello zuccherificio di Codigoro e di Po di Volano", appartenente alla rete Natura 2000 e di semplificarne la costruzione è stato progettato in cavo AT interrato.

Gli edifici presenti sono posti a circa 11 metri dal margine della strada al di sotto della quale sarà interrato il cavo. Questo garantisce di per sé il rispetto delle DPA previste.



Figura 10 – Foto aerea con individuazione del ricettore sensibile e progetto dell'elettrodotto interrato a 132 kV



Figura 11 – Vista del ricevitore e della strada sotto cui interrare il cavidotto

5 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 dei raccordi a 132 kV in progetto alla nuova SE 380/132 kV Fiscaglia dagli esistenti elettrodotti oggi afferenti alla CP Codigoro, nel dettaglio:

- SE Fiscaglia – CP Tresigallo;
- SE Fiscaglia – CP Ariano;
- SE Fiscaglia – CP Volania;
- SE Fiscaglia – CP Codigoro 1 (1° antenna);
- SE Fiscaglia – CP Codigoro 2 (2° antenna).

I calcoli effettuati in base a quanto stabilito dal DM 29/05/2008 utilizzando i valori di corrente riportati in tabella 3 hanno permesso di determinare le “Distanze di Prima approssimazione” sintetizzate nel capitolo 3.4; per una comprensione migliore dell’andamento delle DPA si rimanda al documento 46421 – Piano particellare dove sono rappresentate graficamente.

Come si evince dall’analisi dei ricevitori precedentemente riportata e dal documento 46421 - Piano particellare, in cui sono riportate le Dpa non sono presenti ricevitori sensibili al loro interno.

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:

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

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

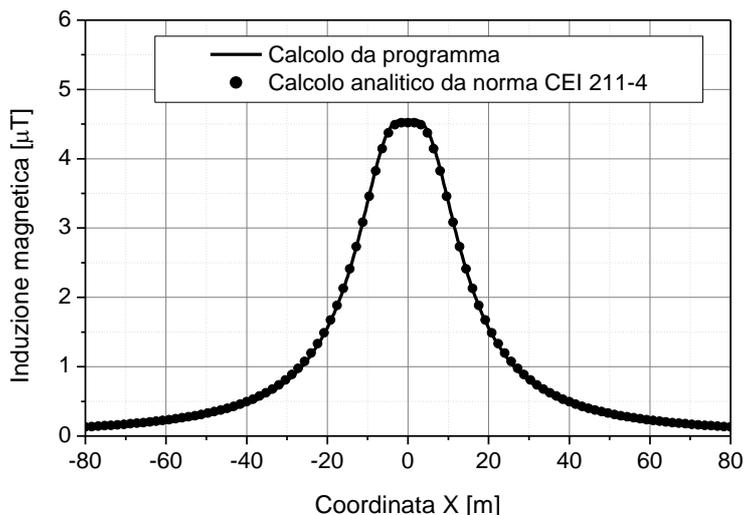


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

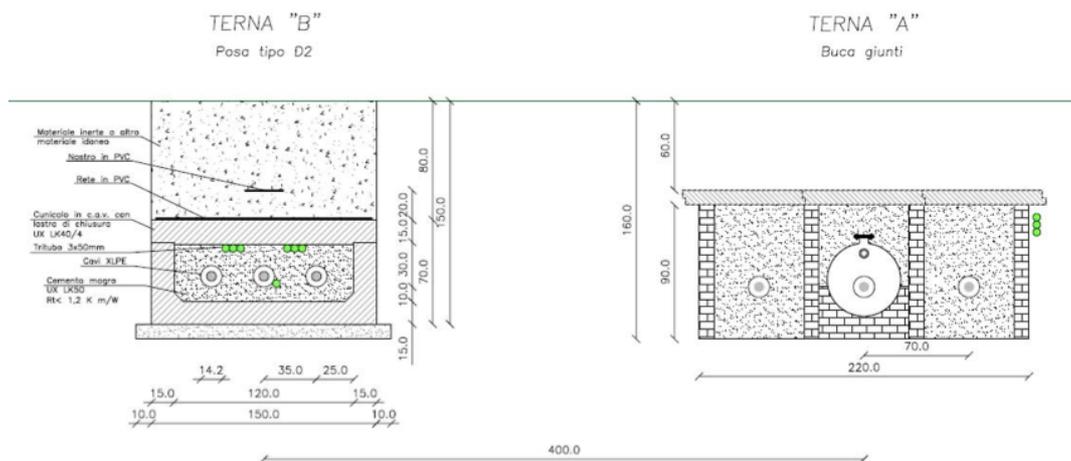


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

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.

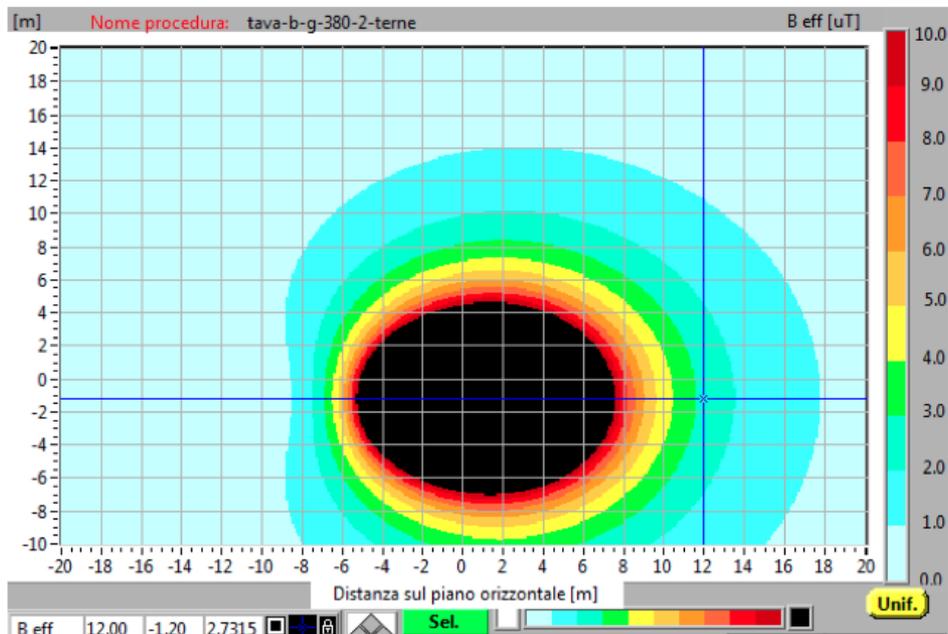


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.

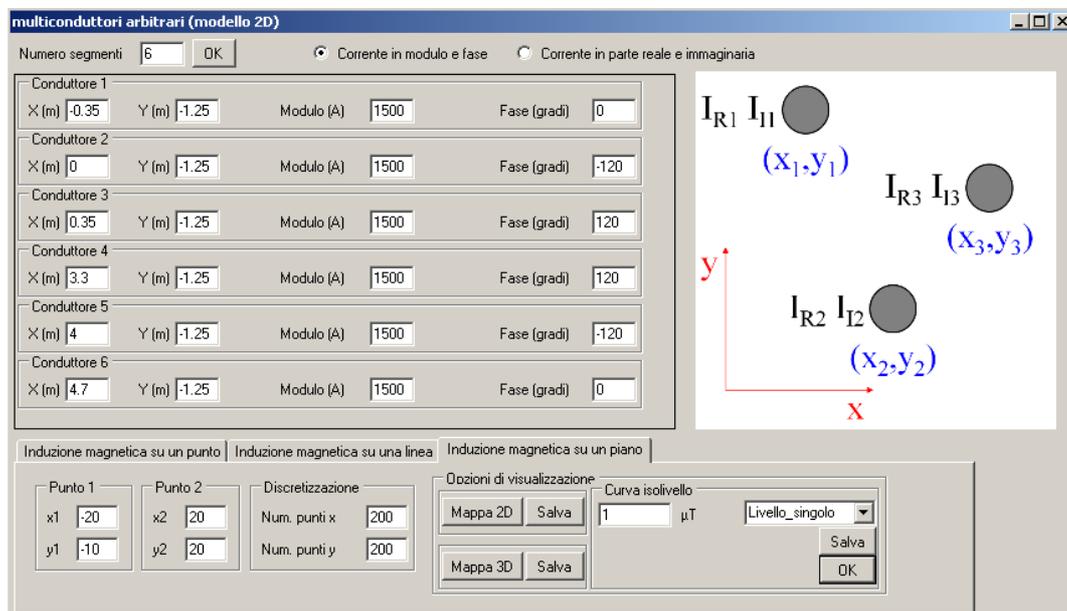


Figura 4: Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)”: dati definizione geometria e sorgenti

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

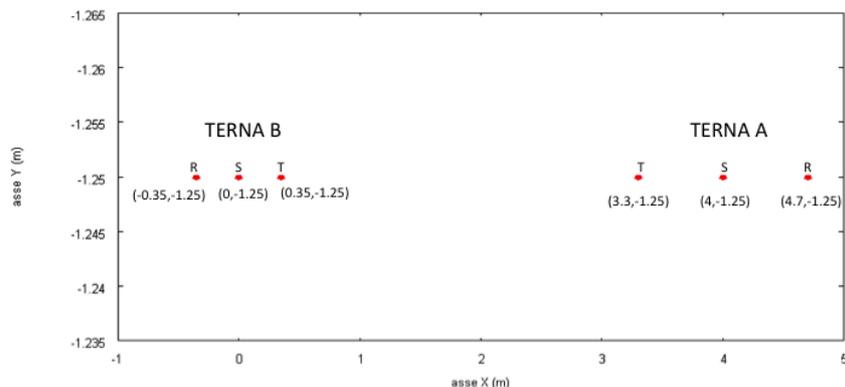


Figura 5: Geometria sorgenti

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

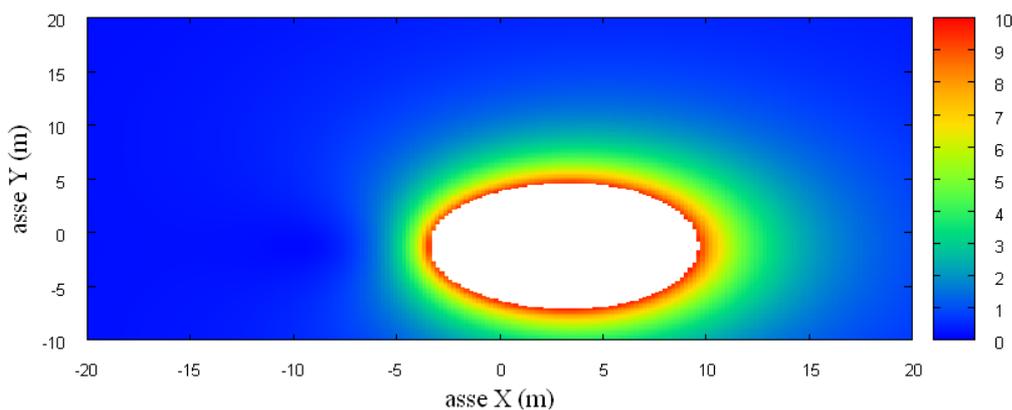


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

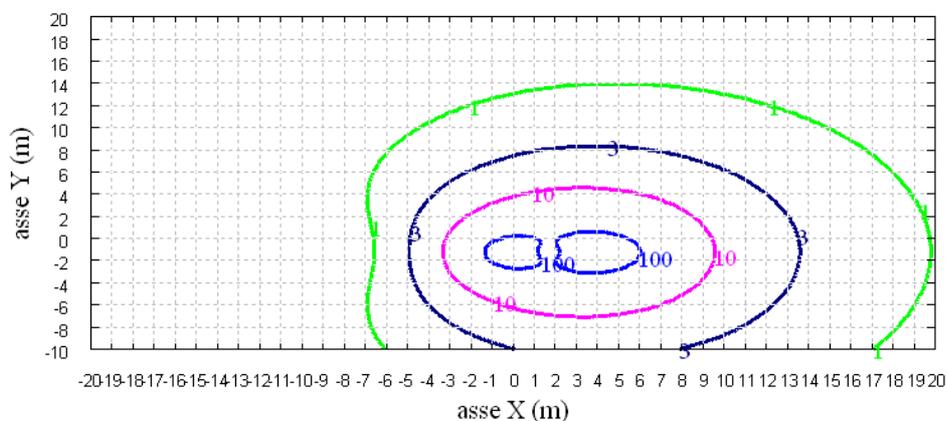
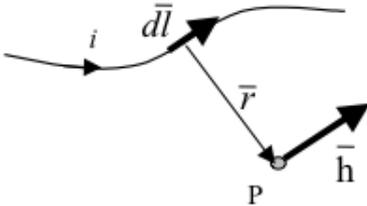


Fig. 7 Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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:

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

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.

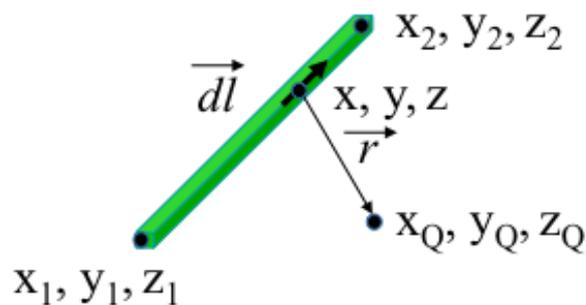


Fig. 8: Modello del segmento.

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

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

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

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

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.

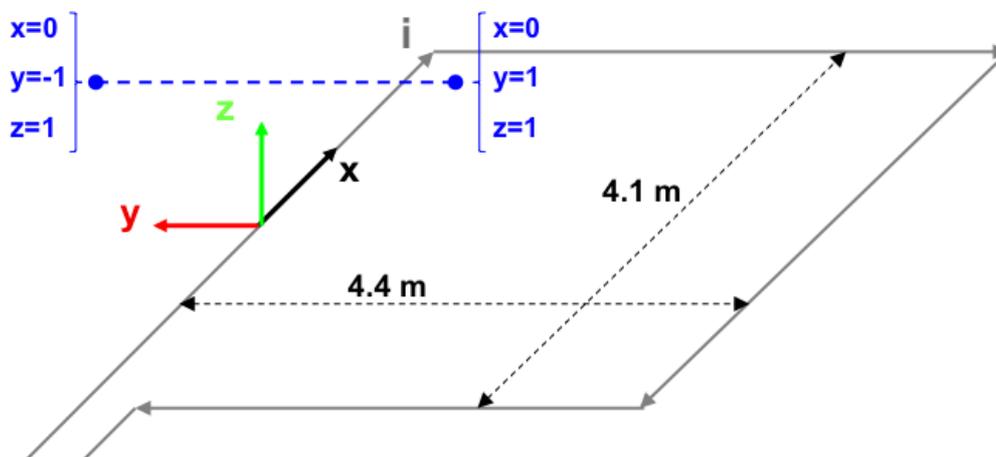


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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 → $x = \text{costante} = 0 \text{ m}$
- 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.

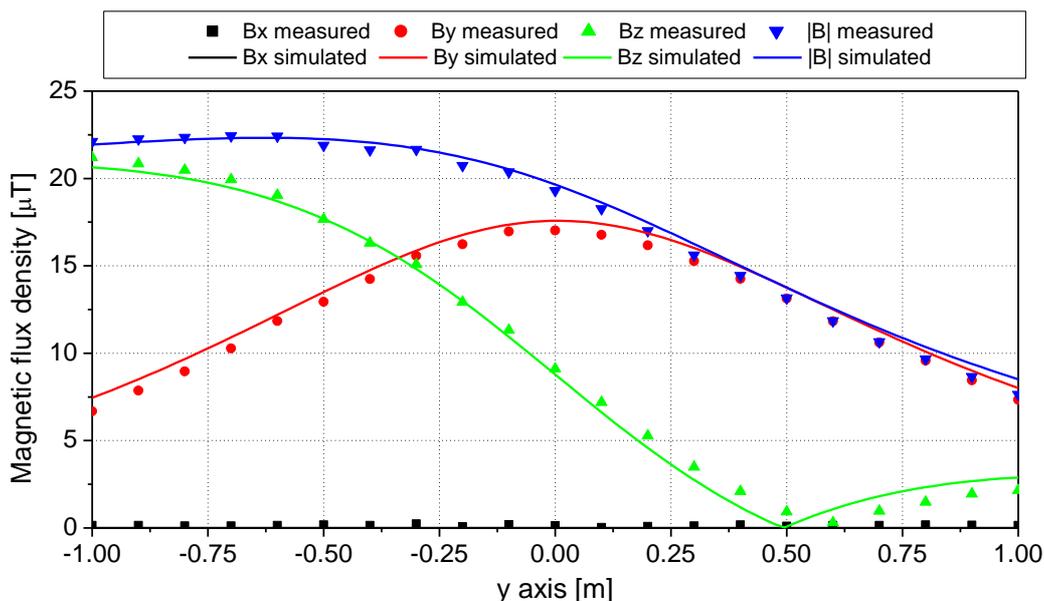


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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

Maggiori dettagli 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.

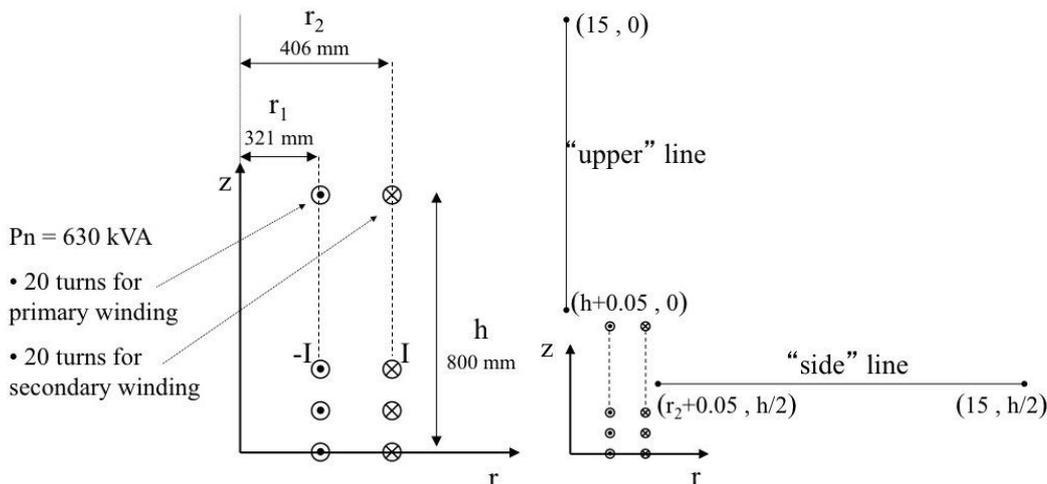


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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).

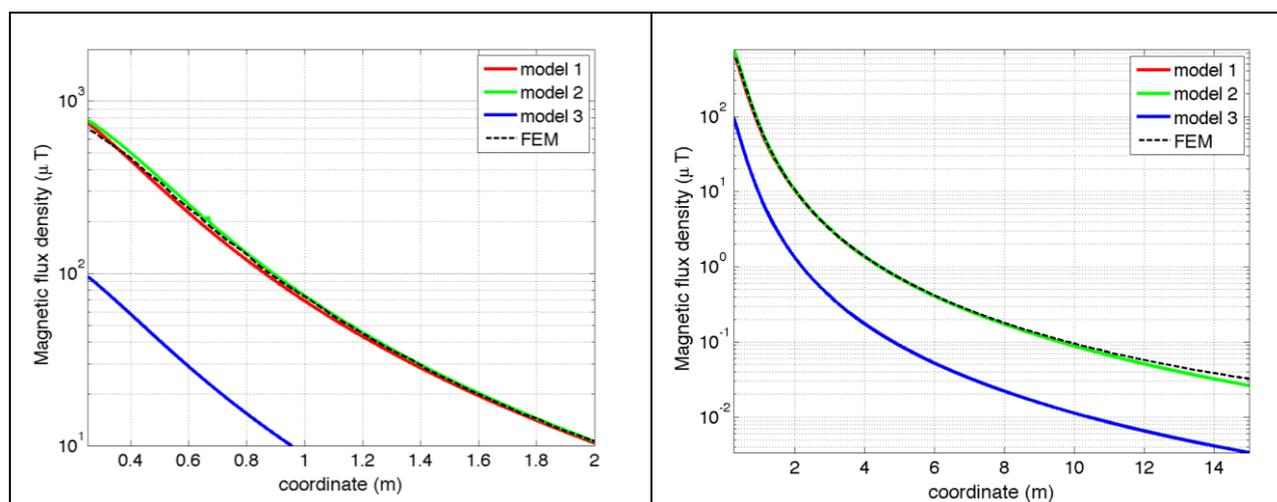


Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale

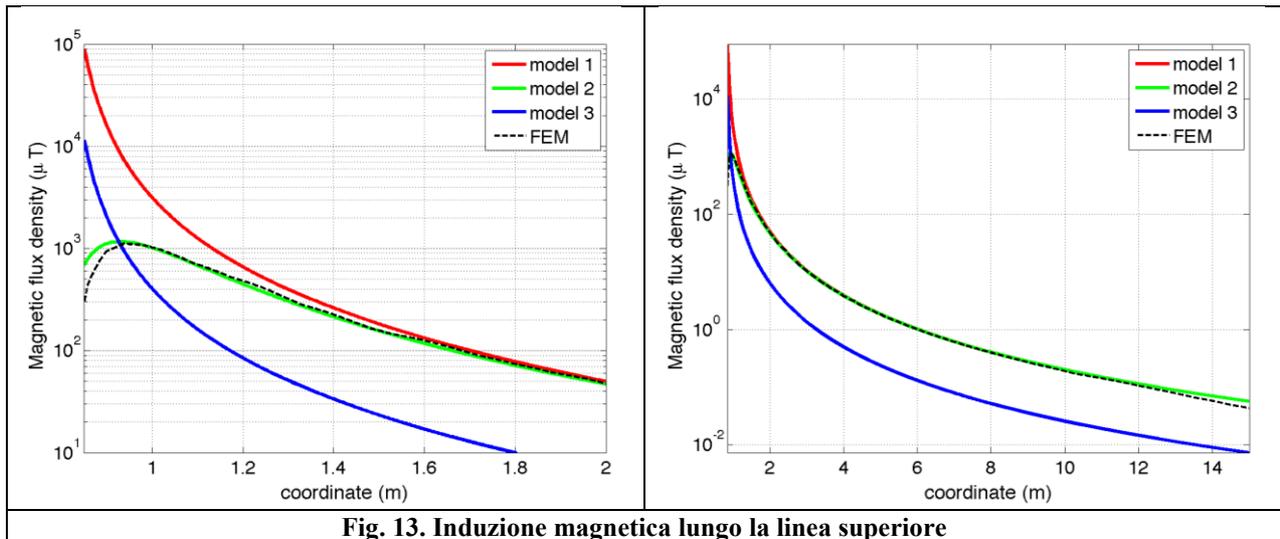


Fig. 13. Induzione magnetica lungo la linea superiore

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 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.

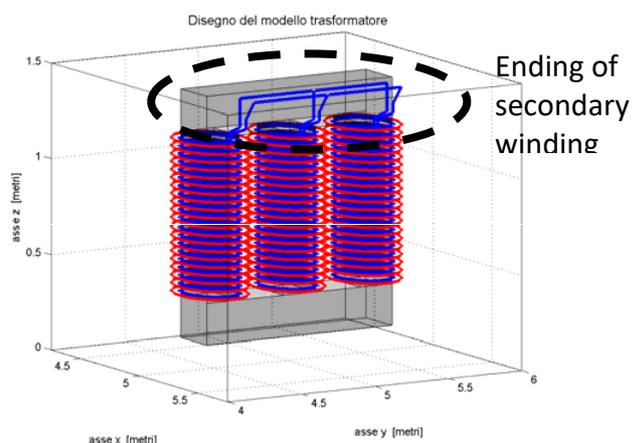


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

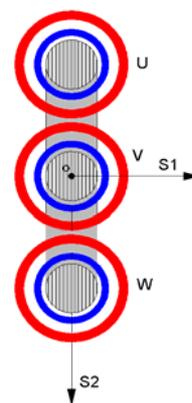


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

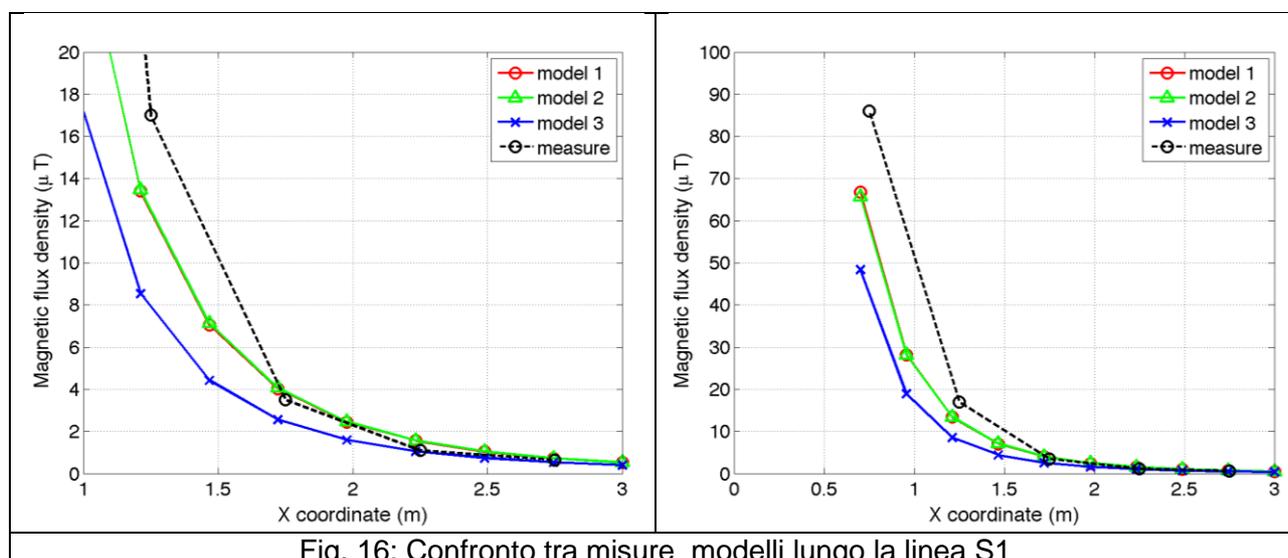


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

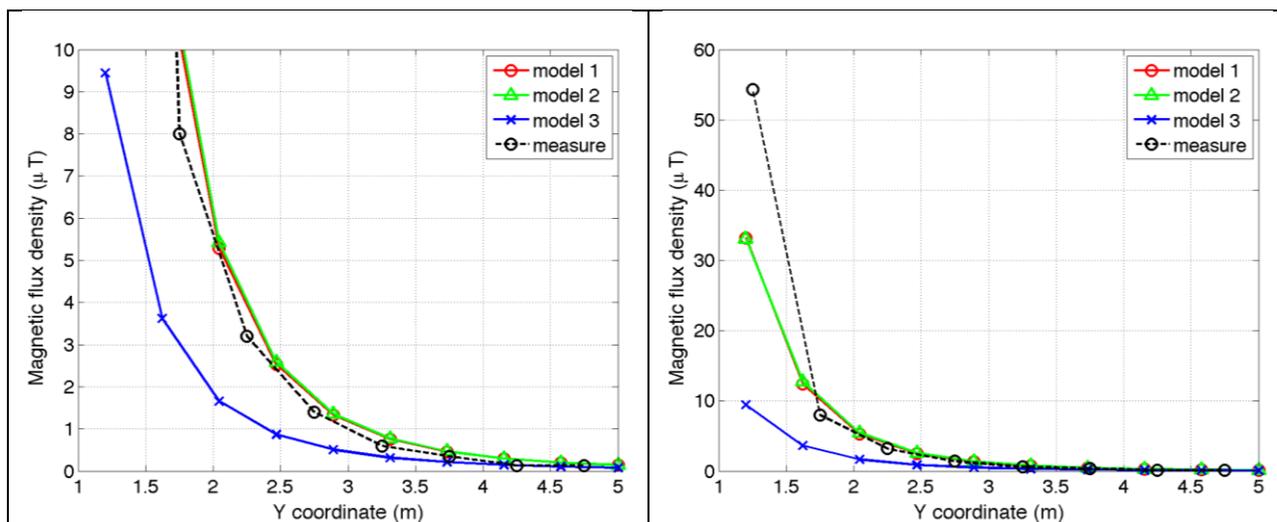


Fig. 17. Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

Conclusioni

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

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

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

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

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