




Fluor Bongiorno

		<i>Fluor Bongiorno</i>	<i>Fluor Bongiorno</i>	<i>Fluor Bongiorno</i>	
A	18.7.2025	103	013	093	Emissione per autorizzazione
REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE
CODICE PRATICA CAPOFILA C.P. 202201461					TIPOLOGIA IMPIANTO CAPOFILA / POTENZA IN IMMISSIONE IMPIANTO FOTOVOLTAICO 56 MW
CAPOFILA Bondeno Srl Via Mike Bongiorno, 13 20124 - Milano Partita IVA 05496160283					POTENZIAMENTO LINEA 132 kV BONDENO - FINALE EMILIA
INGEGNERIA & COSTRUZIONI BRULLI trasmissione					TITOLO RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI
SCALA -	FORMATO A4	FOGLIO / DI 1 / 22		N. DOCUMENTO 5 1 6 8 0 4 A	

 Reggio nell'Emilia - ITALIA	Progetto POTENZIAMENTO LINEA 132 kV BONDENO – FINALE EMILIA Relazione campi elettrici e magnetici	Documento e revisione 516804A 2																								
<p>SOMMARIO</p> <table><tr><td>1</td><td>PREMESSA.....</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>QUADRO NORMATIVO</td><td>4</td></tr><tr><td>3</td><td>METODOLOGIA DI CALCOLO</td><td>5</td></tr><tr><td>3.1</td><td>Calcolo del Campo Magnetico.....</td><td>5</td></tr><tr><td>3.2</td><td>Correnti di calcolo</td><td>6</td></tr><tr><td>3.3</td><td>Risultati</td><td>6</td></tr><tr><td>4</td><td>ANALISI DEI RICETTORI</td><td>7</td></tr><tr><td>5</td><td>CONCLUSIONI.....</td><td>8</td></tr></table>			1	PREMESSA.....	3	2	QUADRO NORMATIVO	4	3	METODOLOGIA DI CALCOLO	5	3.1	Calcolo del Campo Magnetico.....	5	3.2	Correnti di calcolo	6	3.3	Risultati	6	4	ANALISI DEI RICETTORI	7	5	CONCLUSIONI.....	8
1	PREMESSA.....	3																								
2	QUADRO NORMATIVO	4																								
3	METODOLOGIA DI CALCOLO	5																								
3.1	Calcolo del Campo Magnetico.....	5																								
3.2	Correnti di calcolo	6																								
3.3	Risultati	6																								
4	ANALISI DEI RICETTORI	7																								
5	CONCLUSIONI.....	8																								


 Reggio nell'Emilia - ITALIA	Progetto POTENZIAMENTO LINEA 132 kV BONDENO – FINALE EMILIA Relazione campi elettrici e magnetici	Documento e revisione 516804A 3
<div data-bbox="148 271 378 297"> 1 PREMESSA </div> <div data-bbox="225 318 1522 409"> <p>L'oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dalla realizzazione del potenziamento dell'esistente elettrodotto 132 kV "Bondeno – Finale Emilia" che collega la cabina primaria CP 132 kV Bondeno con la cabina primaria CP 132 kV Finale Emilia.</p> </div> <div data-bbox="225 441 1522 501"> <p>Il tracciato studiato per il ripotenziamento dell'esistente elettrodotto 132 kV Bondeno – Finale Emilia è localizzato nei Comuni di Bondeno (Provincia di Ferrara) e di Finale Emilia (Provincia di Modena).</p> </div> <div data-bbox="225 530 1522 685"> <p>L'attività in oggetto verrà realizzata nell'ambito del progetto di connessione a 36 kV dell'impianto fotovoltaico della società Bondeno Srl alla futura Stazione Elettrica RTN 132/36 kV Bondeno (CP 202201461). In particolare, alla futura SE 132/36 kV Bondeno verranno ricollegate le linee RTN a 132 kV "Finale Emilia – Bondeno" oggetto della presente analisi, "Bondeno – Ferrara Cassana" e "Bondeno – Palantone con deriv. Pilastresi All.", oggi afferenti alla Cabina Primaria di Bondeno, previo:</p> </div> <div data-bbox="272 685 1522 873"> <ul style="list-style-type: none"> • potenziamento/rifacimento della linea RTN a 132 kV "Bondeno – Finale Emilia"; • realizzazione di un nuovo elettrodotto RTN a 132 kV tra la nuova SE suddetta e la futura sezione a 132 kV dell'esistente SE RTN a 380 kV denominata "Ferrara Nord"; • realizzazione dei nuovi elettrodotti a 132 kV "Ferrara Cassana – Ferrara Nord" e "Ferrara Nord – Ferrara ZI" (opera parte del Piano di Sviluppo Terna, e pertanto esclusa da quelle in progettazione da parte del presente tavolo tecnico). </div> <div data-bbox="225 902 1522 994"> <p>Lo studio oggetto della presente relazione è inerente esclusivamente al potenziamento dell'elettrodotto RTN a 132 kV tra la nuova SE Bondeno e la cabina primaria Finale Emilia, con target di portata estiva minima di 500 A.</p> </div> <div data-bbox="225 1025 1522 1368"> <p>L'attuale elettrodotto aereo, che collega la CP 132 kV Bondeno e la CP 132 kV Finale Emilia, è armato lungo l'intero tratto con conduttore ACSR $\varnothing 22,8$ mm. Il gestore della rete ha evidenziato la necessità di potenziare tale direttrice, per garantire una portata continuativa non inferiore a 500 A, anche nel periodo estivo. I parametri limite di progettazione, oltre alla portata di corrente, sono il rispetto del franco minimo di legge (come da DM LLPP 21 marzo 1988) e del valore di qualità per i campi magnetici di 3 μT, così come previsto dal DM 8 luglio 2003. In base alla corrente target richiesta, sulle tratte esistenti verrà mantenuto il conduttore ACSR $\varnothing 22,8$ mm installato, verificato però in condizioni extra – franco a 75°C. L'utilizzo di questo conduttore è previsto anche lungo la nuova campata (tra il palo gatto in SE Bondeno e P78N) che si discosterà dal tracciato esistente, per la quale le specifiche tecniche prevederebbero invece l'utilizzo del conduttore ACSR $\varnothing 31,5$ mm. Si preferisce adottare in via cautelativa questa condizione in modo tale da evitare squilibri meccanici sui pali, causati dalle condizioni di tiro differenti dovuto all'utilizzo di due conduttori differenti.</p> </div> <div data-bbox="225 1400 1522 1460"> <p>La presente progettazione prevede di mantenere le palificazioni esistenti e semplicemente di demolire le tratte tra la futura SE 132/36 kV Bondeno e la Cabina Primaria 132 kV Bondeno.</p> </div> <div data-bbox="225 1460 1522 1554"> <p>La linea sarà di tipo aereo su cui verrà tesato il conduttore ACSR $\varnothing 22,8$ mm con le attuali condizioni di tiro, dimensionato nel rispetto della normativa di riferimento dei campi elettromagnetici e verificato sulla nuova capacità di trasmissione della linea richiesta da Terna in sede di consistenza delle opere, e cioè 500 A estivi.</p> </div> <div data-bbox="225 1583 1522 1677"> <p>Come da unificazione Terna il franco minimo cautelativo sarà di 10 metri per tutte le tratte oggetto di rifacimento ovvero di 6,3 m per tutte le tratte dove invece non verranno modificati i sostegni esistenti ma verrà solamente ri-tesato il conduttore.</p> </div> <div data-bbox="225 1706 1522 1769"> <p>Nelle immagini seguenti riportiamo l'ortofoto con l'inquadramento della linea esistente oggetto di potenziamento.</p> </div>		



Figura 1 Inquadramento linea 132 kV Bondeno – Finale Emilia

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 si riporta 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	5.000	-
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 DM LLP del 16 Gennaio 1991. Nella normativa viene specificato inoltre che, per le stazioni e cabine 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.).

3 METODOLOGIA DI CALCOLO

La rete elettrica nazionale, di cui l'elettrodotto esistente 132 kV “Bondeno – Finale Emilia” fa parte, è esercita alla frequenza di 50 Hz. A questa frequenza i campi elettrici e magnetici generati dagli elementi attivi sono due fenomeni distinti, il primo proporzionale alla tensione degli stessi, mentre il secondo proporzionale alla corrente che vi circola.

Anche i limiti applicabili per la tutela della salute della popolazione per questi due fenomeni sono molto differenti: per il campo elettrico è previsto il solo rispetto del limite di esposizione, mentre per il campo magnetico è previsto anche il rispetto di un valore di qualità, per luoghi in cui è prevista la permanenza per un tempo superiore alle 4 ore/giorno. È possibile, pertanto, analizzare distintamente i due aspetti.

In base alle “Linee Guida per l'applicazione del punto 5.1.3 dell'allegato al DM 29/05/2008” elaborate da Enel, non è necessario effettuare il calcolo dei livelli di campo elettrico per tensioni inferiori o uguali a 150 kV in quanto dette linee guida specificano che “a valle di misure e valutazioni effettuate sulle proprie linee elettriche 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”.

3.1 Calcolo del Campo Magnetico

Al fine di stimare il campo magnetico prodotto dagli elettrodotti in oggetto, per determinare le DPA da applicare, si è effettuato il calcolo teorico in considerazione di quanto previsto dal Decreto Ministeriale 29/05/2008, utilizzando la portata definita dalla norma CEI 11-60 come descritto nel capitolo seguente.

Il calcolo del campo magnetico è stato effettuato utilizzando il software Magic di BESHielding. Il software permette di calcolare i campi magnetici generati da sorgenti di tipo elettrico, quali trasformatori, sistemi di linee elettriche, stazioni, cabine elettriche, buche giunti, blindosbarre e impianti elettrici. Il software permette la determinazione delle fasce di rispetto per linee elettriche e cabine elettriche, secondo quanto previsto dalla Legge Quadro No. 36/2001 (esposizione ai campi magnetici della popolazione) e dal D.lgs. No. 81/08 (valutazione dei rischi in ambiente lavorativo). Il software 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, tenendo conto della tridimensionalità delle sorgenti, della loro reale posizione e della sovrapposizione degli effetti delle diverse componenti.

Al fine di calcolare le DPA da applicarsi alla linea in progetto è stato individuato un sostegno tipo tra quelli installati sull'elettrodotto esistente, in particolare è stato considerato il sostegno che presenta la disposizione delle fasi con conduttori più distanti, il quale comporta un valore maggiore del campo magnetico prodotto. Nella prima fase sono state calcolate le DPA della linea presumendo che i tralicci esistenti siano tutti idonei e il potenziamento della linea preveda il solo aumento della corrente che vi può transitare.

Sovrapponendo le DPA così calcolate con ortofoto e catasto, si sono individuati i ricettori che ricadono all'interno di dette fasce e in base al sopralluogo e alla stima puntuale del campo magnetico si è determinato se e dove è necessario procedere alla modifica dell'altezza del traliccio esistente o del traliccio dell'elettrodotto.

3.2 Correnti di calcolo

Per la definizione delle correnti si è partiti considerando 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.P.C.M. 08/07/2003, 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 – Portate in corrente del conduttore di riferimento

L'elettrodotto in oggetto è localizzato in provincia di Ferrara e Modena, quindi si colloca in zona B.

Secondo quanto definito dalla norma CEI 11-60 per tutti i conduttori aventi diametro diverso da quello di riferimento ossia 31,5 mm, la portata in corrente si ottiene applicando la seguente formula:

$$I_R = (0,14 * \varnothing^2 + 30,8 * \varnothing - 110) * I_0 * 10^{-3}$$

dove il diametro \varnothing nel caso in progetto è uguale a 22,8 mm mentre la corrente I_0 del conduttore di riferimento è pari a 575 A nel periodo caldo. Dalla formula si ottiene un I_R pari a 383 A.

La norma CEI 11-60 prevede che le portate di progetto "standard" definite al punto 3.1 e riportate nella Tabella 2, possano essere variate applicando dei fattori correttivi in base alle reali condizioni di progetto delle linee. In particolare, la norma prevede tre condizioni in cui occorre applicare fattori correttivi al calcolo della corrente:

- quando il parametro di posa è diverso da quello del conduttore di riferimento;
- quando esiste uno squilibrio effettivo tra le campate;
- quando il progetto dell'elettrodotto venga realizzato tenendo conto di franchi maggiorati.

Il progetto è realizzato tenendo conto – per la verifica delle altezze al suolo e delle distanze di rispetto – di una temperatura maggiore di quella prevista per la norma CEI 11-60 e dal DM 21 Marzo 1988, questo comporta la verifica dell'elettrodotto con franchi maggiorati e quindi le correnti che transitano sulla linea in periodo freddo, considerando la portata target di 500 A in periodo caldo, divengono le seguenti:

Tensione nominale della linea kV	Zona B	
	Periodo C	Periodo F
132÷150	500	584

Tabella 3 – Portate in corrente maggiorate

Nel caso in progetto, secondo quanto stabilito dalla norma CEI 11-6, considerando i franchi maggiorati si ottiene una corrente di progetto nel periodo freddo pari a **584 A**, relativa alla portata target di 500 A nel periodo estivo.

3.3 Risultati

I valori di campo magnetico generati dall'elettrodotto sono calcolati al fine di definire le ampiezze delle Distanze di Prima Approssimazione da applicarsi dall'asse dell'elettrodotto. Tali valori sono desunti utilizzando le correnti come descritto nel capitolo precedente. Al fine del calcolo del campo magnetico è stata scelta cautelativamente la configurazione dei pali peggiore al fine del calcolo delle DPA (disposizione delle fasi con conduttori più distanti).

Per l'intera tratta dell'elettrodotto è stato considerato, cautelativamente, l'inserimento del sostegno E.

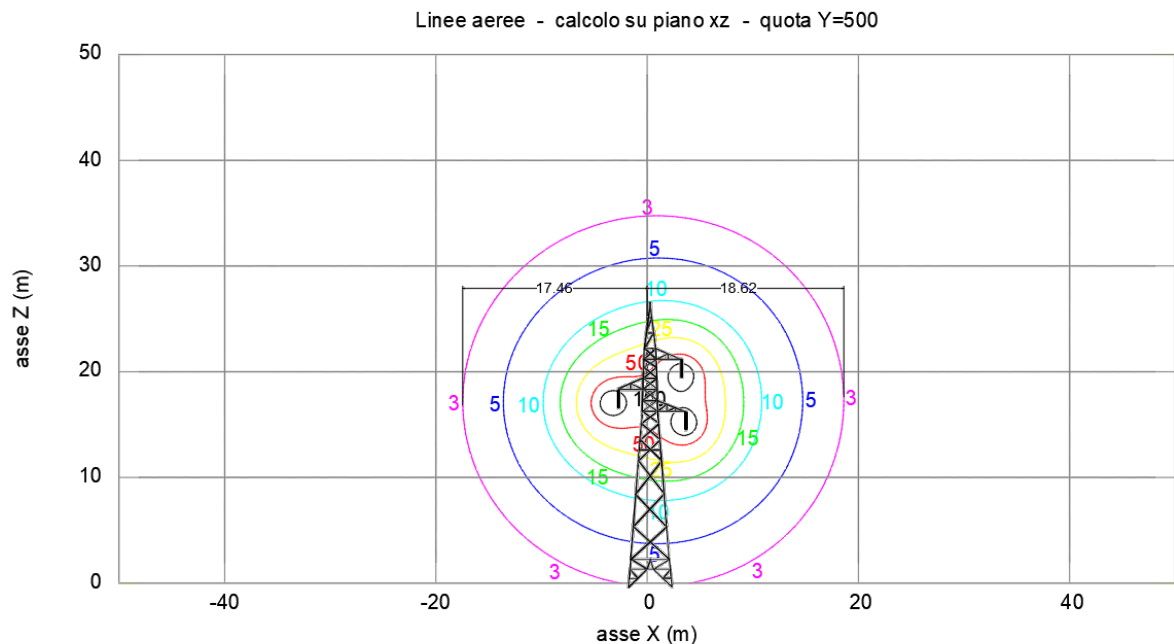



Figura 2 - Curve di isolivello del campo magnetico

Dal grafico in Figura 4 si evince che dal lato della doppia mensola il valore di $3 \mu\text{T}$ si raggiunge ad una distanza di 18,62 m dall'asse del traliccio e 17,46 m dal lato della mensola singola. Arrotondando al primo intero la DPA da applicarsi risulta pertanto pari a **19** metri.

4 ANALISI DEI RICETTORI

La corretta progettazione della linea comporta il rispetto delle DPA in prossimità di tutti i ricettori sensibili presenti sul tracciato. Si è proceduto pertanto a sovrapporre il tracciato della linea con le rispettive DPA, come precedentemente calcolate su ortofoto. Dalla comparazione tra DPA, ortofoto e catasto sono stati individuati i ricettori più prossimi alla linea stessa ed è stato verificato il rispetto del valore di qualità.

Nelle schede seguenti riportiamo l'analisi dei ricettori più prossimi alle DPA per come cautelativamente calcolate.

 Reggio nell'Emilia - ITALIA	Progetto POTENZIAMENTO LINEA 132 kV BONDENO – FINALE EMILIA Relazione campi elettrici e magnetici	Documento e revisione 516804A 8
--	---	---

CARATTERISTICHE RICETTORE

ID	1	edificio
CAMPATA	Tralicci n.	55÷56
COMUNE	(MO)	Finale Emilia
PARTICELLE	Foglio	49
	Particella	89
DESTINAZIONE D'USO CATASTALE	A02 D10	Abitazione di tipo civile e fabbricato rurale con fini strumentali all'agricoltura
COORDINATE	WGS84	44°50'46.16"N 11°19'14.80"E
QUOTA	mslm	7,5
DISTANZA ASSE LINEA	m	23
INDUZIONE MAGNETICA	μT	1,571



Nel caso in progetto non sono stati individuati recettori che ricadono all'interno delle DPA. Cautelativamente si è proceduto a calcolare il valore di induzione magnetica nel ricettore ID1 in quanto prossimo al limite delle DPA considerate. Come si osserva il valore calcolato cautelativamente a 7,5 m dal suolo è ampiamente al di sotto del valore di qualità di 3 μT.

Poiché non ci sono ricettori ricadenti totalmente all'interno delle fasce determinate per le DPA, non sono state apportate modifiche al tracciato esistente della linea.

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.

I calcoli effettuati in base a quanto stabilito dal DM 29/05/2008 e dalle Linee Guida per l'applicazione del punto 5.1.3 dell'allegato al DM 29/05/2008, hanno permesso di determinare la ampiezza della Distanza di Prima Approssimazione pari rispettivamente a 19 metri da applicare al nuovo elettrodotto.

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.

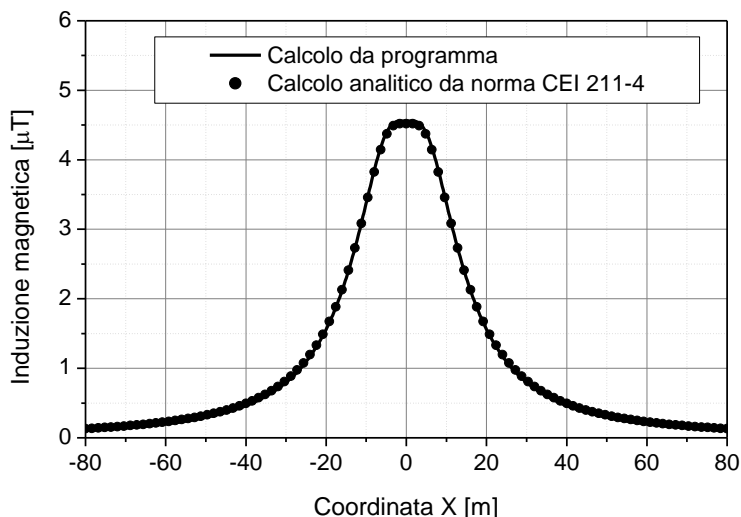


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

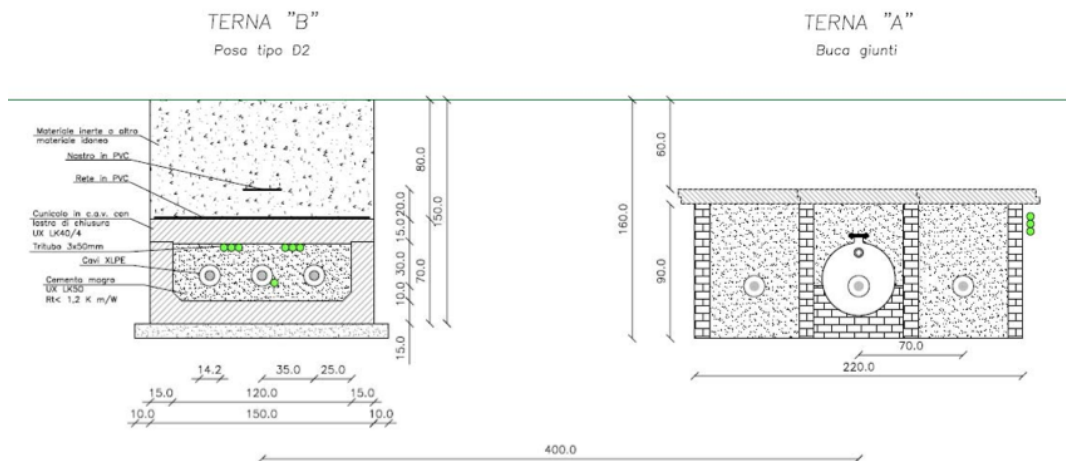


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

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.

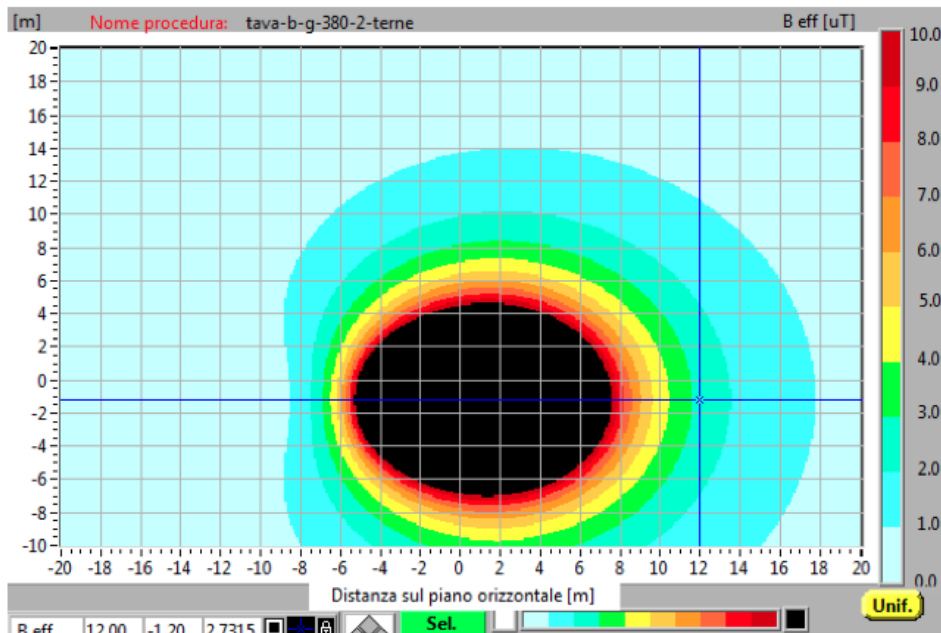


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.

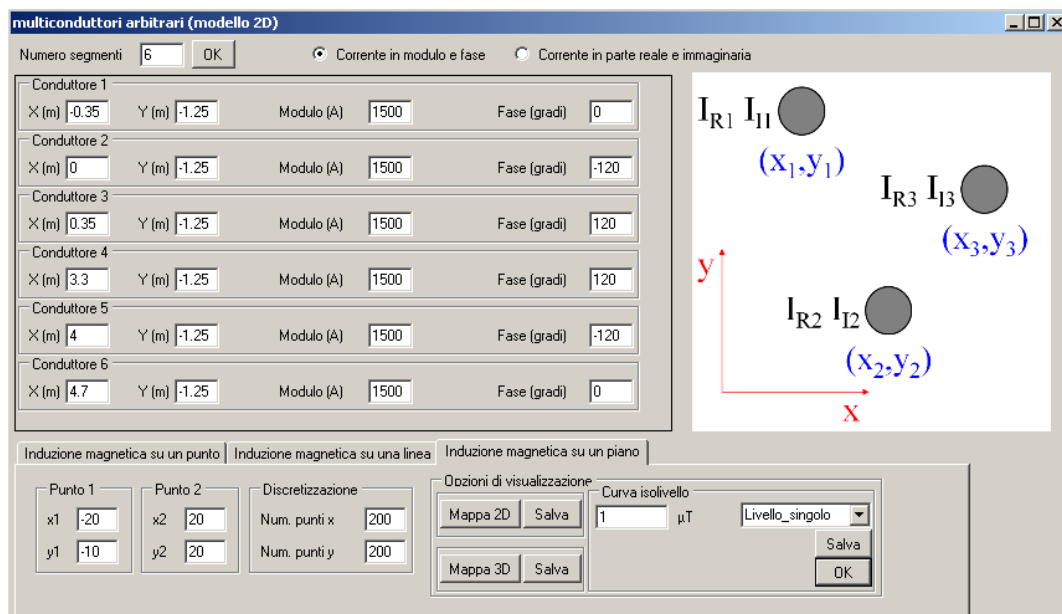


Figura 4:Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)””: dati definizione geometria e sorgenti

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

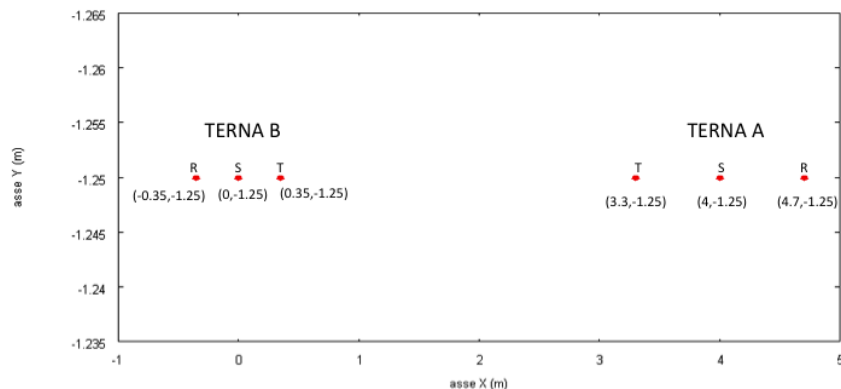


Figura 5: Geometria sorgenti

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

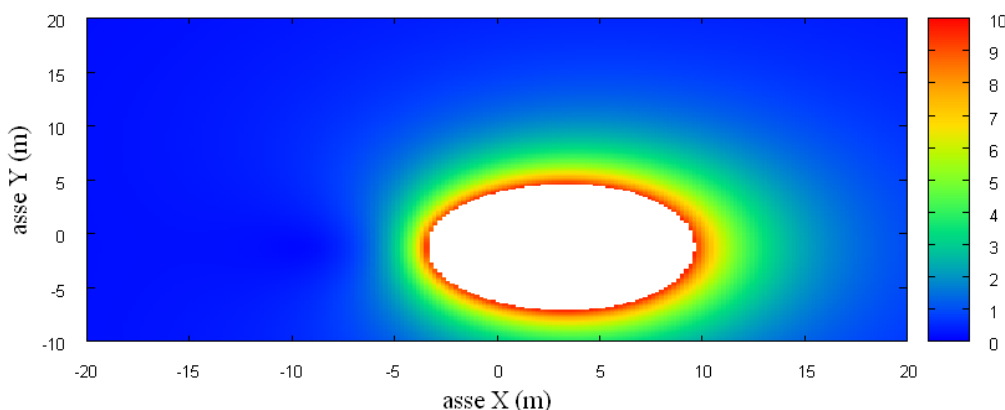


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

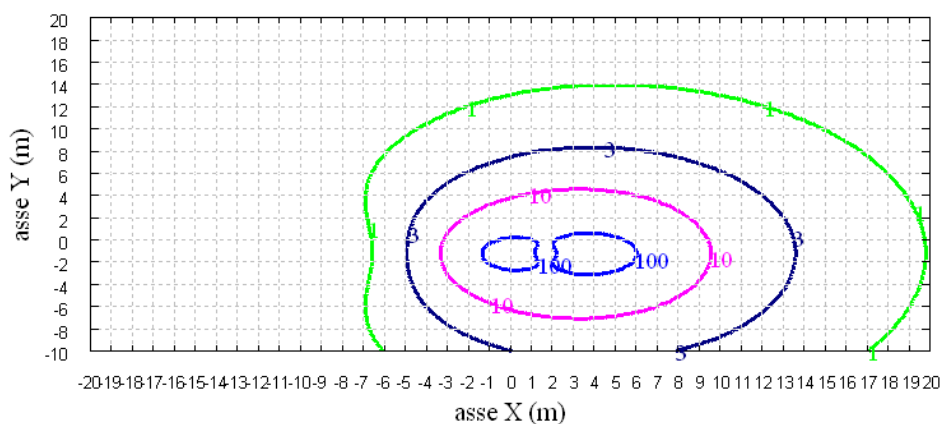


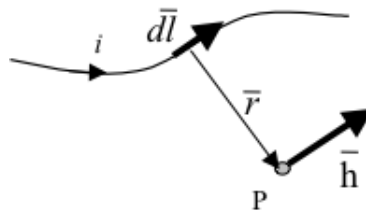
Fig. 7 Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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:

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



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.

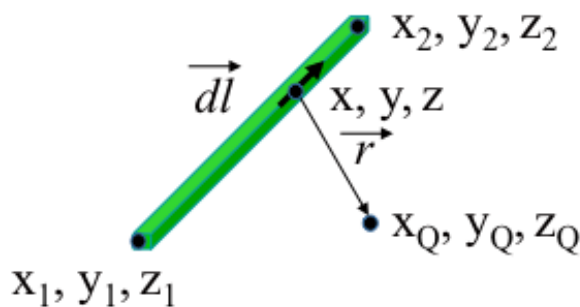


Fig. 8: Modello del segmento.

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

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

$$$$

$$$$

Si consideri inoltre che:

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

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

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.

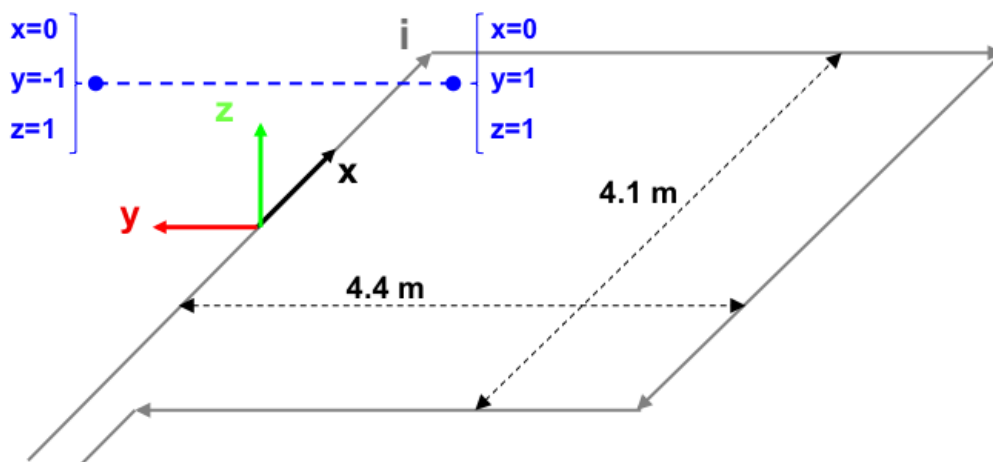


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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.

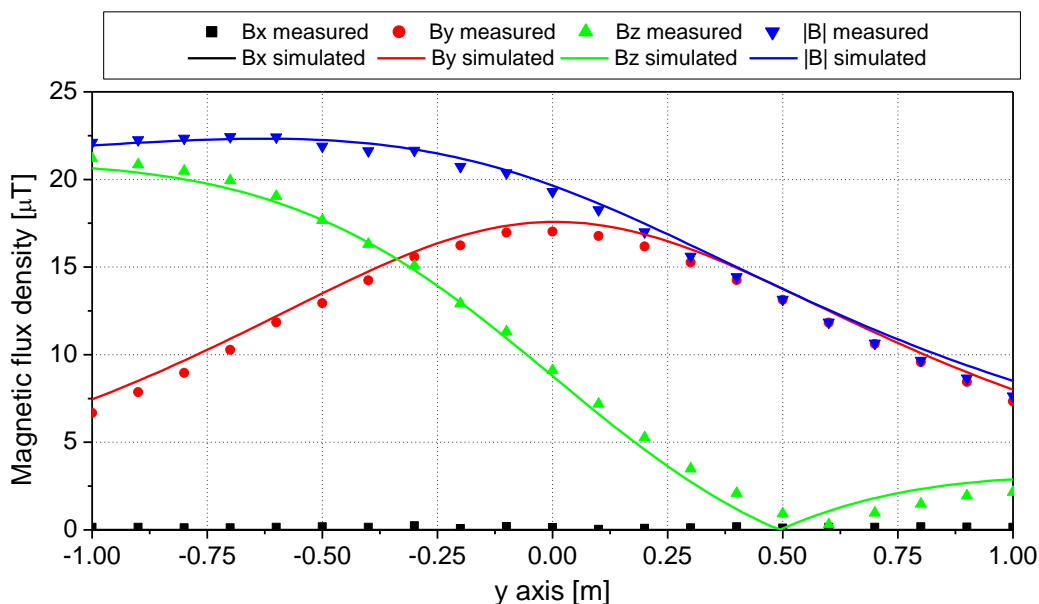


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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

Maggior 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.

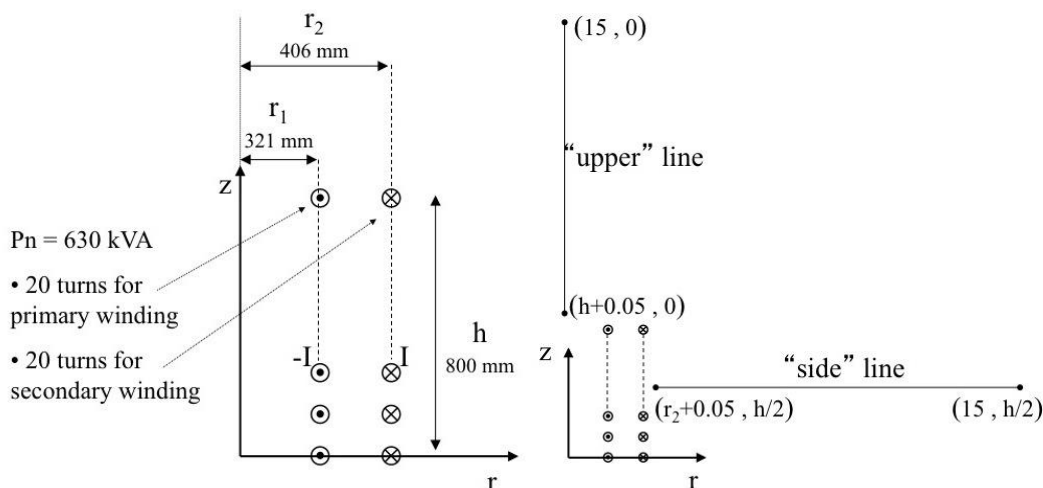


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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).

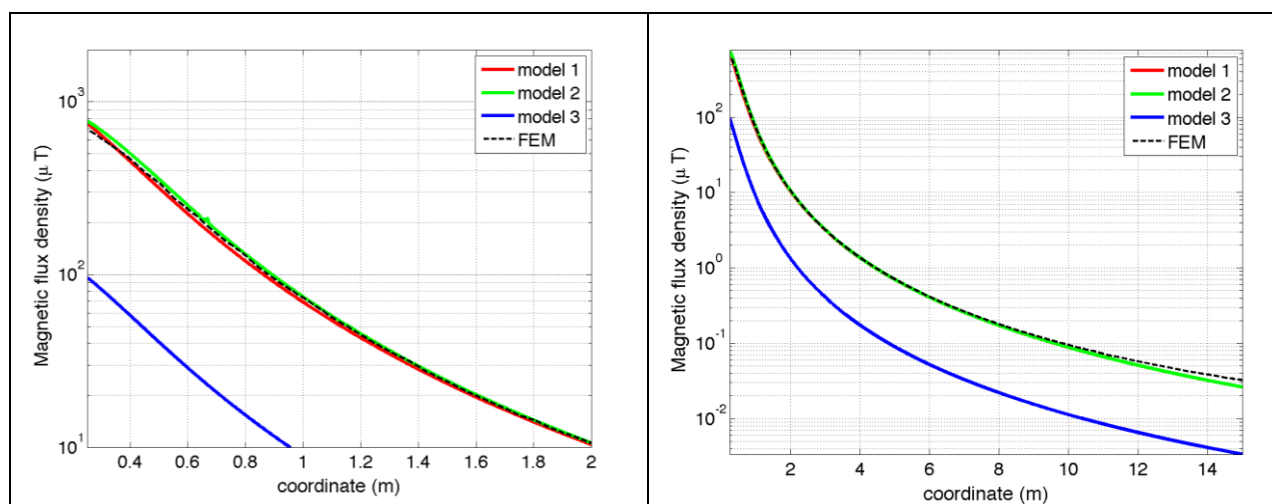


Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale

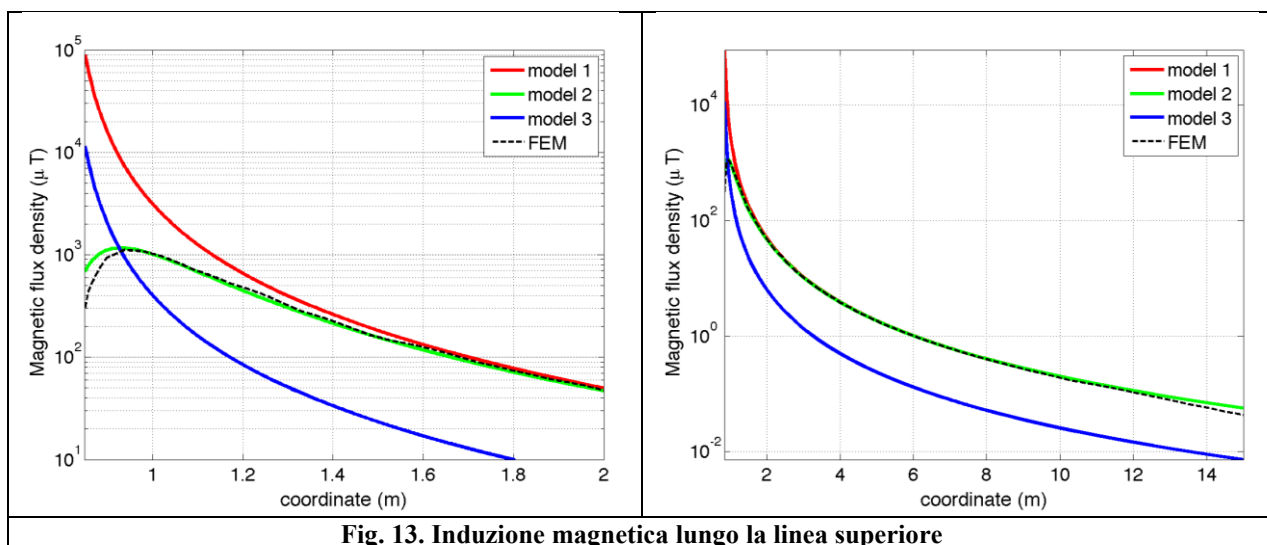


Fig. 13. Induzione magnetica lungo la linea superiore

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.

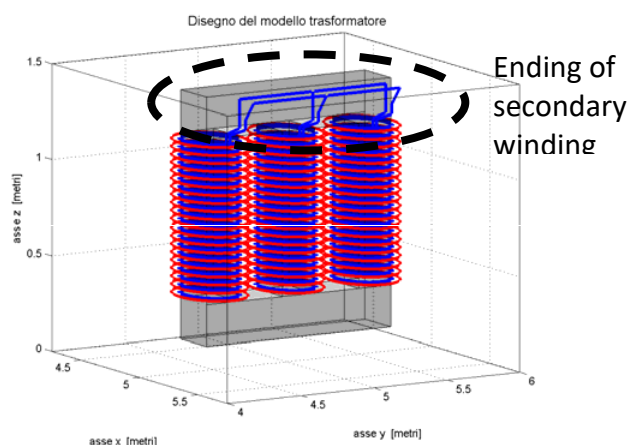


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate al lati BT.

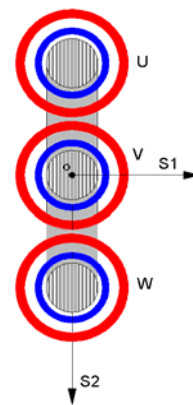


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

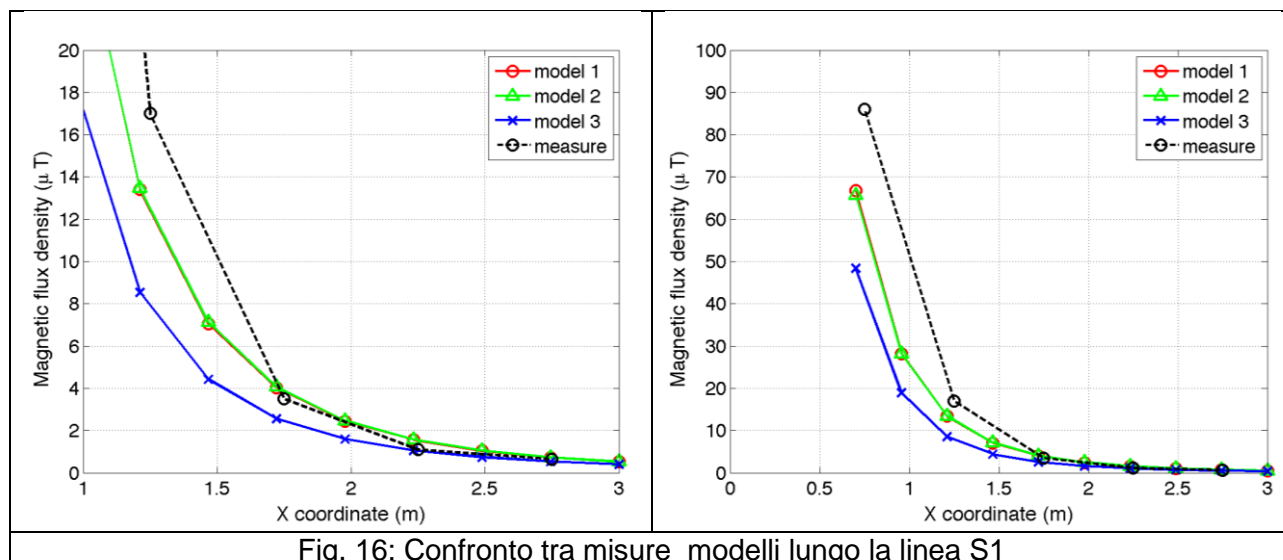


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

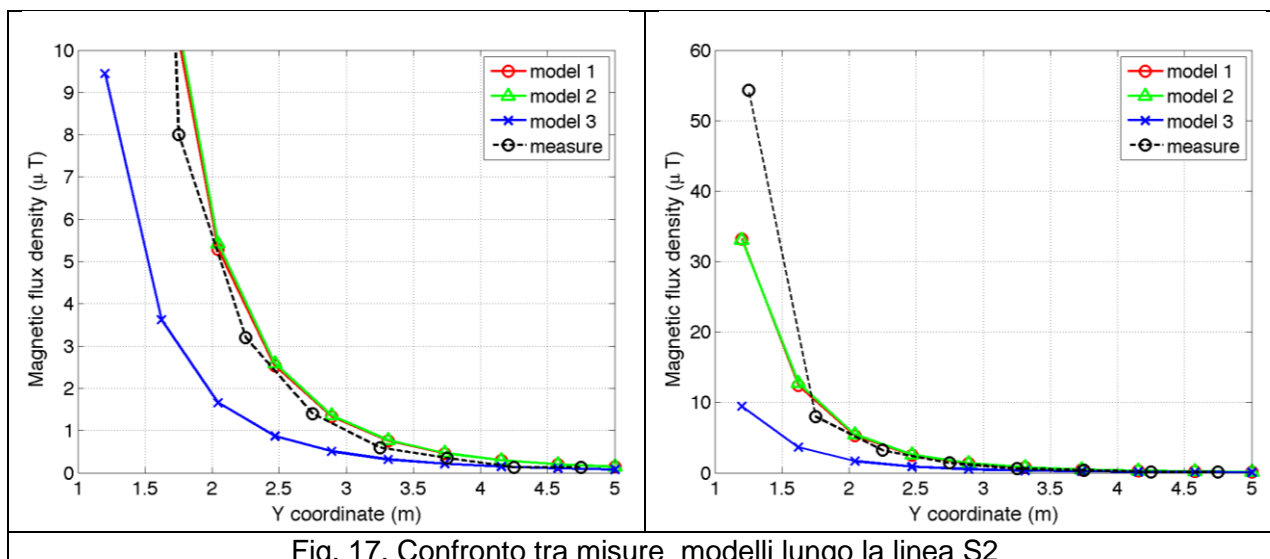


Fig. 17. Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

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.