



*Flavio Brusaporci*

		<i>Flavio Brusaporci</i>	<i>Flavio Brusaporci</i>	<i>Flavio Brusaporci</i>	
A	21.11.2025	117	013	093	Emissione per studio di prefattibilità
REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	DESCRIZIONE
CODICE PRATICA <b>C.P. 202201881 (e-distribuzione)</b>					TIPOLOGIA IMPIANTO / POTENZA IN IMMISSIONE <b>CP GRILLARA POTENZA IN IMMISSIONE ED IN PRELIEVO 33 MW</b>
PROPONENTE <b>ARIAN SOLAR Srl</b> Piazza San Sepolcro, 1 20123 - Milano (MI)					IMPIANTO <b>POTENZIAMENTO LINEA 132 kV CODIGORO - ARIANO</b>
INGEGNERIA & COSTRUZIONI <b>BRULLI</b> <b>trasmissione</b>					TITOLO <b>RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI</b>
SCALA  -	FORMATO  A4	FOGLIO / DI  1 / 34		N. DOCUMENTO  5 1 0 8 0 4 A	

## SOMMARIO

1. PREMESSA.....	3
2. QUADRO NORMATIVO .....	4
3. CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI GENERATI DALLE STAZIONI DI TRASFORMAZIONE CON ISOLAMENTO IN ARIA.....	6
4. CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI GENERATI DAI RACCORDI .....	7
4.1 Metodologia di calcolo .....	7
4.2 Calcolo dei campi elettrici.....	7
4.3 Calcolo dei campi magnetici.....	8
4.3.1 Correnti di calcolo .....	9
4.4 Risultati .....	9
5. ANALISI DEI RICETTORI .....	12
5.1 Schede ricettori sensibili .....	19
6. CONCLUSIONI.....	20

## 1. PREMESSA

L'oggetto della presente relazione è il calcolo dei campi elettrici e magnetici generati del progetto per la realizzazione del potenziamento della linea 132 kV "Codigoro-Ariano", ubicata nei Comuni di Codigoro e Mesola (provincia di Ferrara).

L'attuale elettrodotto aereo, che collega la "CP 132 kV Ariano" e la "CP 132 kV Codigoro" è armato lungo l'intero tratto con conduttore in rame diametro 10,5 mm (sezione 65,81 mm<sup>2</sup>). Il gestore della rete ha evidenziato la necessità di potenziare tale direttrice, per garantire una portata continuativa non inferiore ad 700 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. Al fine di soddisfare le prescrizioni sopra citate, la progettazione richiede il completo rifacimento della linea, in quanto la palificata attualmente installata non permette la tesatura di conduttori di portata adeguata al soddisfacimento della portata richiesta. Al fine di rispettare i parametri meccanici per i quali la linea risulta essere ad oggi verificata, si ritiene plausibile l'utilizzo di una nuova palificata a semplice terna armata con conduttore del tipo ACSR ø31,5 mm.

L'identificazione del tracciato dell'opera in progetto è riportata in Figura 1. Con il colore azzurro è rappresentato il nuovo tracciato dell'elettrodotto 132 kV "Codigoro-Ariano" in progetto mentre il tratto color magenta si riferisce al tracciato esistente dell'elettrodotto aereo che collega la "CP 132 kV Ariano" e la "CP 132 kV Codigoro" che verrà demolito.

Come riportato nella documentazione di progetto, nell'ambito del progetto EG Flora, è prevista l'interruzione della linea proveniente dalla CP Ariano a valle del collettore acque alte, a sud del sostegno P3 per poi proseguire fino alla SE 380/132 kV "Fiscaglia". Inoltre, è previsto il ricollegamento della CP Codigoro alla stessa SE Fiscaglia. Mediante tale intervento, quindi, la CP Ariano sarà collegata non più alla CP Codigoro, bensì - tramite la SE Fiscaglia - alla rete 380 kV.

Il ripotenziamento dell'attuale elettrodotto aereo 132 kV "Codigoro-Ariano" prevederà la dismissione e successiva demolizione di quest'ultimo e la realizzazione di un nuovo elettrodotto 132 kV che collegherà la CP Ariano alla SE Fiscaglia. I raccordi aerei dalla SE Fiscaglia alla nuova linea e alla CP Codigoro non sono oggetto del progetto in esame. Il dettaglio di ciò è visibile in Figura 2.

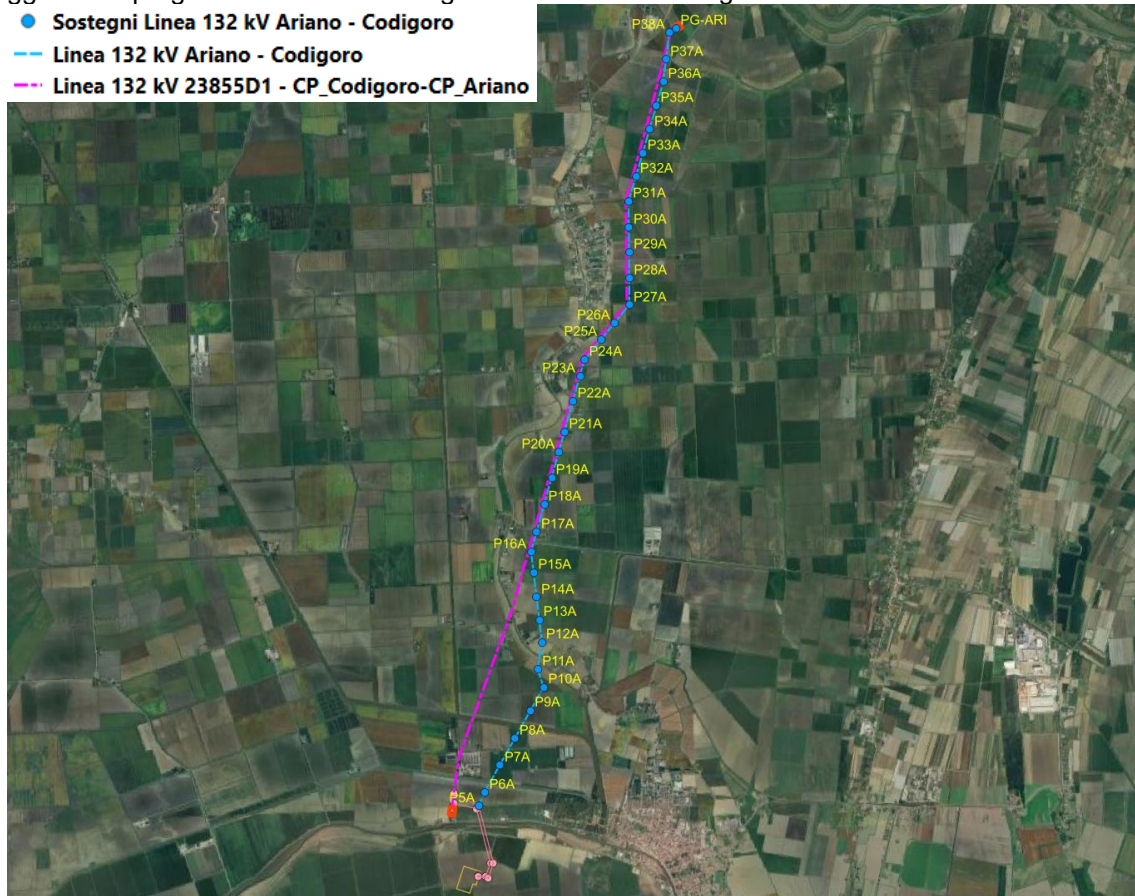


Figura 1

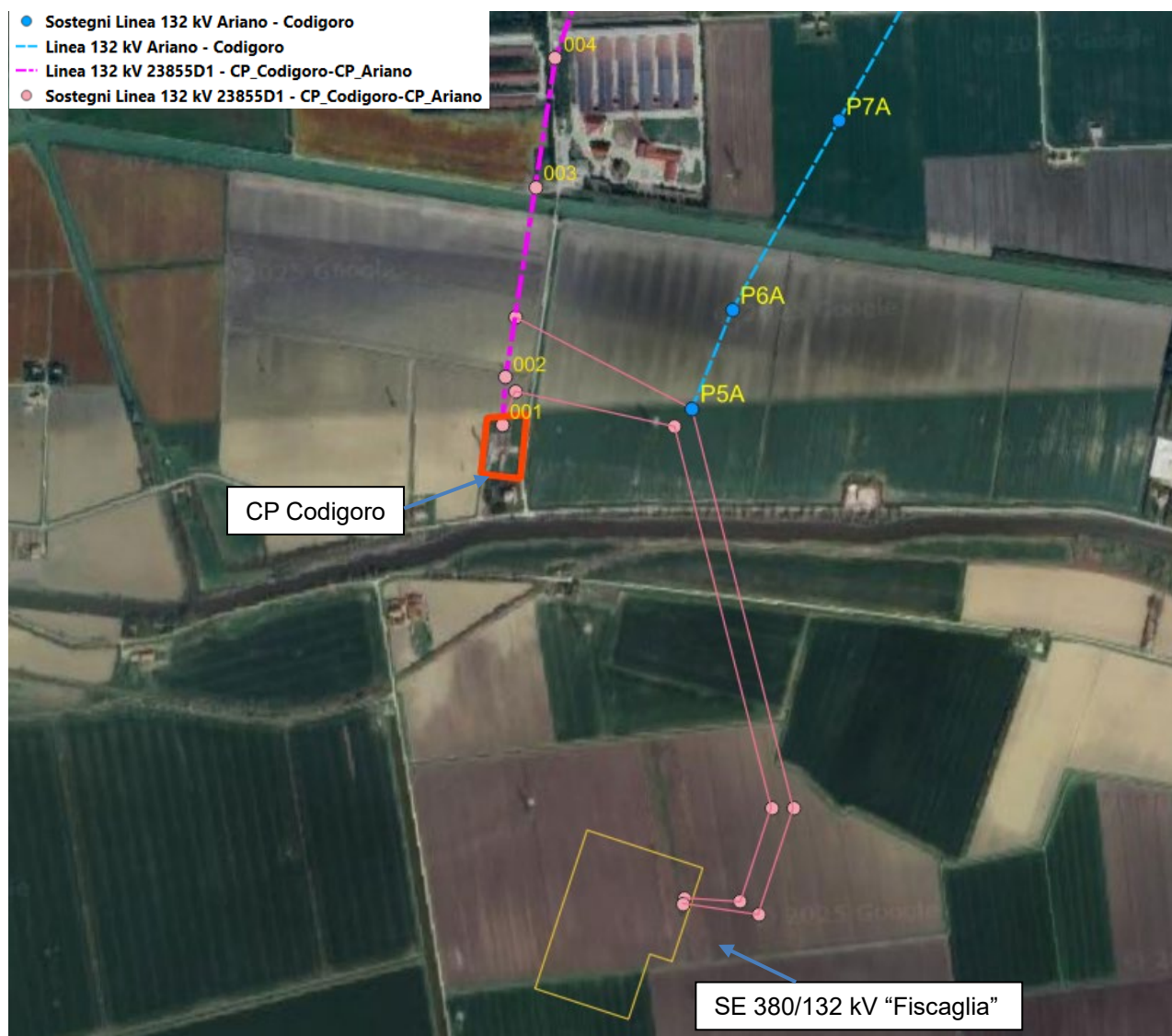


Figura 2

## 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.



	<b>Campo magnetico (<math>\mu</math>T)</b>	<b>Campo elettrico (kV/m)</b>	<b>NOTE</b>
Limite di esposizione	100	5	-
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. CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI GENERATI DALLE STAZIONI DI TRASFORMAZIONE CON ISOLAMENTO IN ARIA

La Figura 3 (corrispondente alla figura 1 del report Terna) mostra la planimetria di una tipica stazione 380/132 kV della Terna all'interno della quale è stata effettuata una serie di misure di campo elettrico e magnetico al suolo.

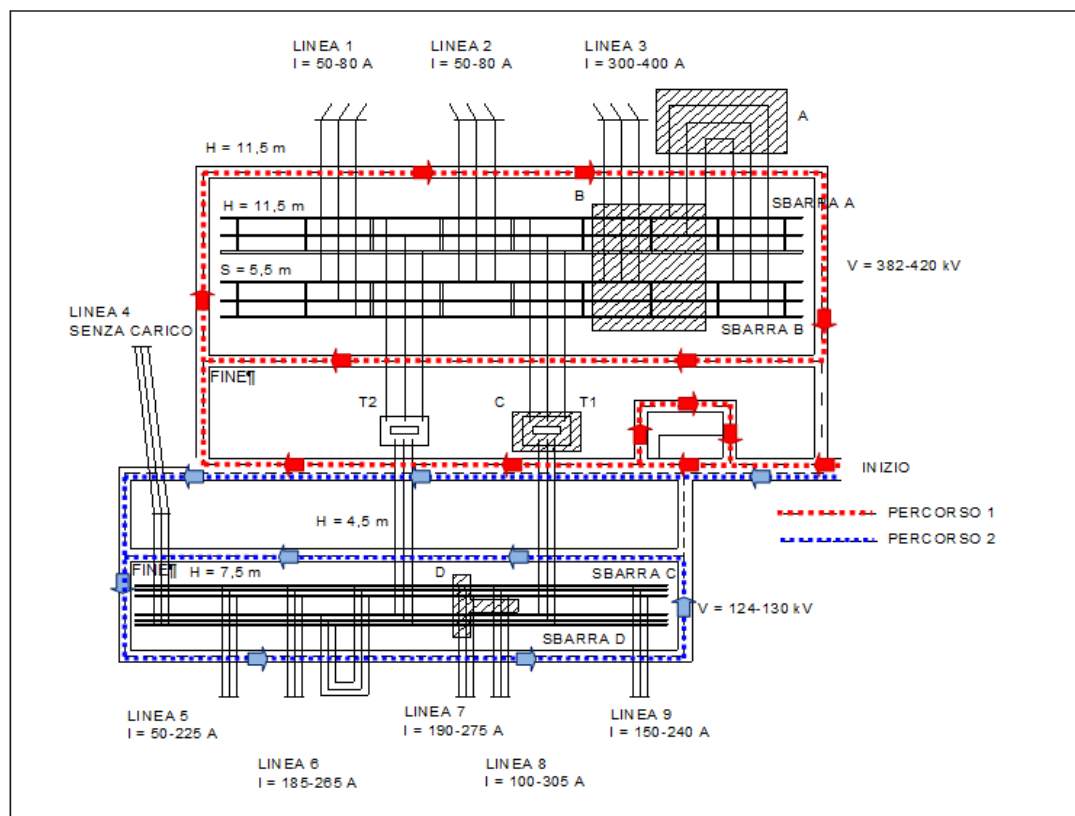


Figura 3 - Pianta di una tipica stazione 380/132 kV con l'indicazione delle principali distanze fase-fase (S) e fase-terra (H), e delle variazioni delle tensioni e delle correnti durante le misurazioni di campo elettrico e magnetico.

La stessa figura fornisce l'indicazione delle principali distanze fase-terra e fase-fase, nonché la tensione sulle sbarre e le correnti nelle varie linee confluenti nella stazione, registrate durante l'esecuzione delle misure. Sono inoltre evidenziate le aree all'interno delle quali sono state effettuate le misure; in particolare, sono evidenziate le zone ove i campi sono stati rilevati per punti utilizzando strumenti portatili (aree A, B, C e D), mentre sono contrassegnate con frecce le vie di transito lungo le quali la misura dei campi è stata effettuata con un'opportuna unità mobile (furgone completamente attrezzato per misurare e registrare con continuità detti campi).

Va sottolineato che, grazie alla modularità degli impianti della stazione, i risultati delle misure effettuate nelle aree suddette sono sufficienti a caratterizzare in modo abbastanza dettagliato tutte le aree interne alla stazione stessa, con particolare attenzione per le zone di più probabile accesso da parte del personale.

Nella Tabella 2 (corrispondente alla tabella 1 del report Terna) è riportata una sintesi dei risultati delle misure di campo elettrico e magnetico effettuate nelle aree A, B, C e D.

Per quanto riguarda le registrazioni effettuate con l'unità mobile, la fig. 2 illustra i profili del campo elettrico e di quello magnetico rilevati lungo il percorso n° 1, quello cioè che interessa prevalentemente la parte a 380 kV della stazione. I valori massimi dei campi elettrici e magnetici esternamente all'area di stazione sono riconducibili ai valori generati dalle linee entranti aeree o in cavo, che sono contenuti nei valori prescritti dalla normativa vigente; l'impatto determinato dalla stazione è quindi compatibile con i valori prescritti dalla normativa stessa.

Area	Numero di punti di misura	Campo Elettrico (kV/m)			Induzione Magnetica ( $\mu\text{T}$ )		
		E max	E min	E medio	B max	B min	B medio
A	93	11,7	5,7	8,42	8,37	2,93	6,05
B	249	12,5	0,1	4,97	10,22	0,73	3,38
C	26	3,5	0,1	1,13	9,31	2,87	5,28
D	19	3,1	1,2	1,96	15,15	3,96	10,17

Tabella 2 - Risultati di misura del campo elettrico e dell'induzione magnetica nelle aree A, B, C e D di Figura 3

Per quanto riguarda le registrazioni effettuate con l'unità mobile, la Figura 2 del report Terna illustra i profili del campo elettrico e di quello magnetico rilevati lungo il percorso N.1, quello cioè che interessa prevalentemente la parte a 380 kV della stazione. I valori massimi di campo elettrico e magnetico sono stati riscontrati in prossimità degli ingressi delle linee aeree aventi, a termini di legge, determinate D.P.A.

I valori massimi dei campi elettrici e magnetici esternamente all'area di stazione sono riconducibili ai valori generati dalle linee entranti aeree o in cavo, e quindi l'impatto determinato dalla stazione stessa è compatibile con i valori prescritti dalla vigente normativa. In tutti gli altri casi i valori del campo elettrico e di quello magnetico riscontrati al suolo all'interno delle aree di stazione sono risultati compatibili con i limiti di legge. Terna ha effettuato analoghe misure anche all'interno di stazioni comprendenti impianti a 220 kV pervenendo a risultati similari.

#### 4. CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI GENERATI DAI RACCORDI

##### 4.1 Metodologia di calcolo

La rete elettrica nazionale, di cui l'elettrodotto esistente 132 kV "Codigoro-Ariano" 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.

Si procederà pertanto nel seguito ad analizzare i due fenomeni in maniera distinta.

##### 4.2 Calcolo dei campi elettrici


La valutazione del campo elettrico al suolo è avvenuta mediante l'impiego di un foglio di calcolo creato sul sito web "WebNIR" sviluppato nell'ambito dei progetti INAIL al fine di determinare i livelli di campo elettrico dispersi da uno o più fasci di conduttori rettilinei indefiniti. Un modello di questo tipo viene comunemente utilizzato per rappresentare gli elettrodotti, come previsto dalla guida CEI 211-4 "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee e stazioni elettriche".

La configurazione della geometria dei sostegni e i valori delle grandezze elettriche sono quelli riportati nelle relazioni tecniche illustrative allegate alla documentazione progettuale.

Per la progettazione degli elettrodotti oggetto di intervento è stato utilizzato un franco minimo da terra di 10 m.

La valutazione del campo elettrico è avvenuta nelle condizioni maggiormente conservative, ad una altezza dal suolo pari a 1,5 m, effettuando la simulazione considerando un'altezza dei conduttori da terra pari al franco minimo previsto.

Valore di picco: 1.2 kV/m a -5 m dall'origine.

Posizioni di intersezione con valori caratteristici 	
Valore	Posizioni
1 kV/m	-8.47 m -1.87 m

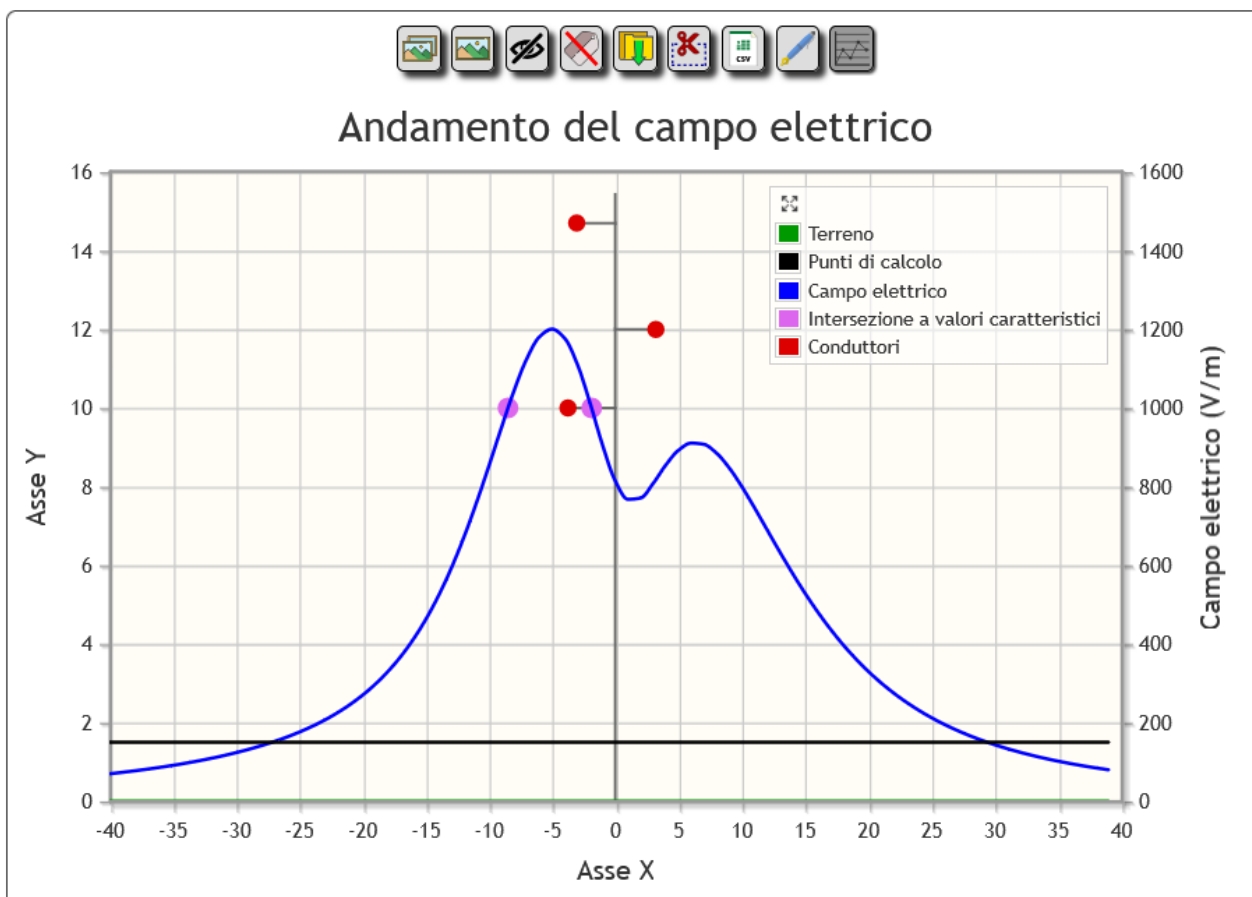


Figura 4: Calcolo del campo elettrico a 1,5 m dal suolo traliccio a triangolo

Dalla simulazione sopra riportata, si osserva che a 1,5 m da terra il limite di esposizione per la popolazione di 5 kV/m è sempre rispettato anche nella condizione cautelativa di conduttori alla distanza di 10 m da terra (franco minimo richiesto da Terna per i nuovi elettrodotti). La simulazione è stata effettuata considerando i conduttori come disposti su traliccio a triangolo.

#### 4.3 Calcolo dei campi magnetici

Al fine di stimare il campo magnetico prodotto dall'elettrodotto in oggetto e determinare le Dpa da applicarle, si è proceduto effettuando il calcolo teorico in considerazione di quanto previsto dal Decreto Ministeriale 29/05/2008, utilizzando la portata in corrente in servizio normale come 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 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.



Al fine di determinare le DPA da applicare alla nuova linea si procede analizzando la tipologia di sostegni che vengono utilizzati nell'intera tratta e scegliendo quello che tra questi presenta una disposizione dei conduttori che genera il campo magnetico massimo (massima distanza tra i conduttori).

Il sostegno E\* non è stato preso in considerazione in quanto utilizzato esclusivamente per i sostegni P10A e P11A, nel punto di intersezione con la linea 380 kV, la quale verrà superata mediante sottopasso. In tale contesto, pertanto, il sostegno E\* non risulta rilevante ai fini dell'analisi complessiva. Si precisa inoltre che, **in corrispondenza delle intersezioni con linee AT esistenti, sarà comunque effettuata un'apposita analisi puntuale** finalizzata a verificare gli eventuali **effetti cumulati**.

Sovrapponendo le DPA così calcolate con ortofoto e catasto sono stati individuati i ricettori che ricadono all'interno di dette fasce; laddove vi è interferenza si è proceduto con l'analisi puntuale verificando i valori di campo magnetico al singolo ricettore.

#### 4.3.1 Correnti di calcolo

La linea aerea in progetto a 132 kV, potenziamento della linea 132 kV "Codigoro-Ariano", sarà realizzata in palificate a semplice terna ed armata con conduttore del tipo ACSR  $\phi 31,5$  mm. Come detto, il gestore della rete ha evidenziato la necessità di potenziare la linea esistente in modo tale da garantire una portata continuativa non inferiore ad 700 A, anche nel periodo estivo.

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	Zona A		Zona B	
kV	Periodo C	Periodo F	Periodo C	Periodo F
132÷150	620	870	575	675

Tabella 3 – Portate in corrente del conduttore di riferimento

I tratti di elettrodotto in oggetto, essendo localizzati in provincia di Ferrara, ad una quota compresa tra 0 e -5 m rispetto al livello del mare, rientrano in zona B; pertanto, la portata in corrente in servizio normale nel periodo invernale tale da garantire una portata continuativa non inferiore ad 700 A anche nel periodo estivo, risulta pari a **824 A**.

#### 4.4 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 dei raccordi aerei. Tali valori sono desunti utilizzando le correnti come descritto nel capitolo precedente. Al fine del calcolo del campo magnetico sono stati analizzati i dati relativi alla linea esistente forniti da Terna, il percorso è stato suddiviso per il calcolo in base alla tipologia di pali esistenti ed è stata scelta cautelativamente la configurazione dei pali peggiore al fine del calcolo delle DPA per ogni tratta (disposizione delle fasi con conduttori più distanti).

Riportiamo nel seguito i risultati delle simulazioni effettuate per la configurazione dei conduttori come disposti sui sostegni a singola terna.

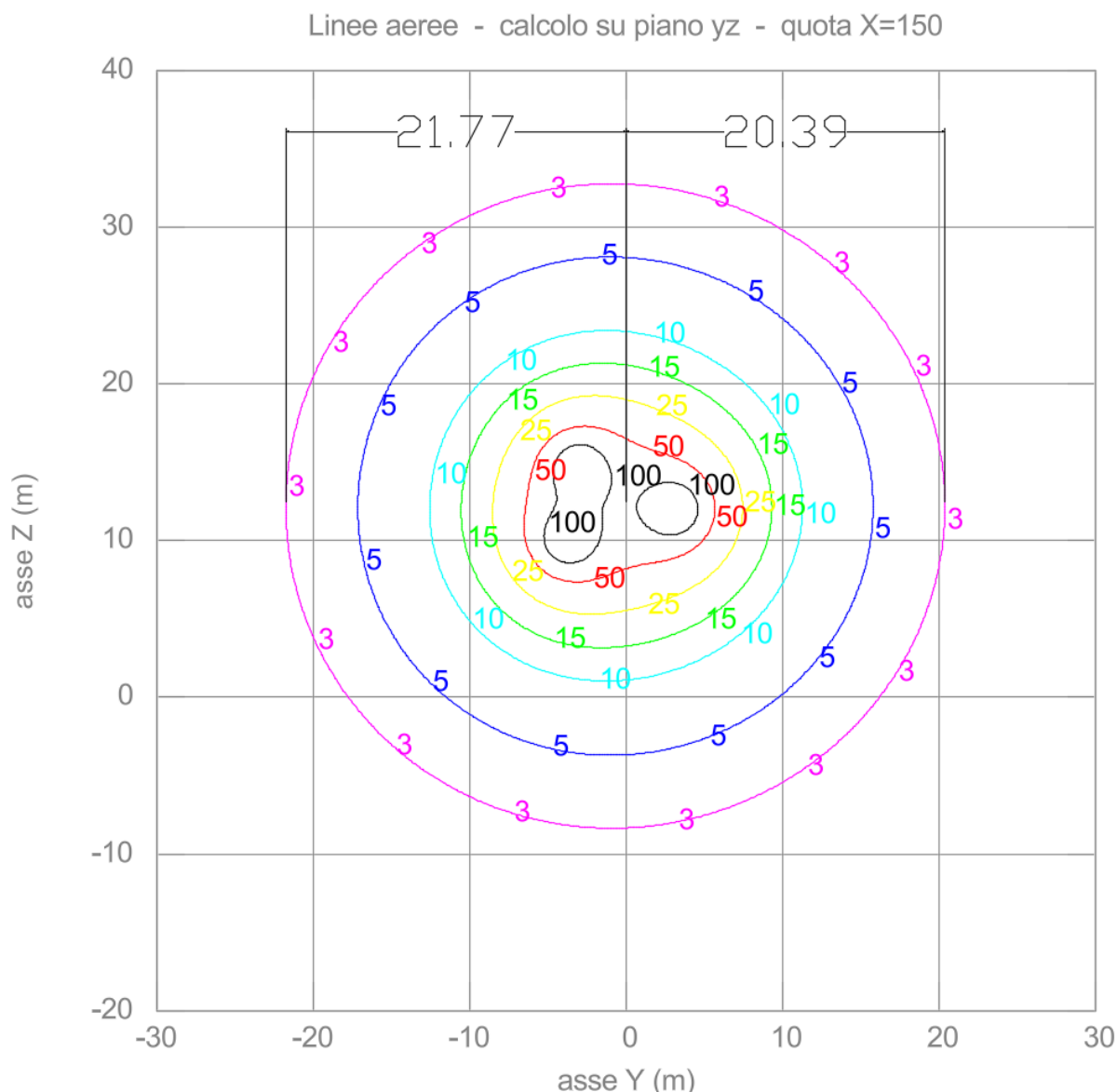


Figura 5 Curve di isolivello del campo magnetico considerando la disposizione dei conduttori più cautelativa

Dal grafico in Figura 5 si evince che dal lato della doppia mensola il valore di  $3 \mu\text{T}$  si raggiunge ad una distanza massima di 21,77 m dall'asse del traliccio e 20,39 m dal lato della mensola singola.

Arrotondando al primo intero la **DPA** da applicarsi risulta pertanto pari a **22 metri**.

Infine, nei punti di intersezione tra linee elettriche esistenti e la nuova linea 132 kV in progetto si è proceduto al calcolo dell'induzione magnetica.

Dall'analisi della planimetria riportata nella Figura 6, in cui è indicata la fascia di  $3 \mu\text{T}$  della linea 132 kV tra la CP Ariano e la SE 380/132 kV Fiscaglia calcolata ad una quota compresa tra le due linee AT, si evince che applicando una DPA di 22 metri (fascia grigia) viene rispettato il valore di qualità di  $3 \mu\text{T}$ , fatta eccezione in corrispondenza del sostegno P11A e della bisettrice dell'angolo interno del sostegno P10A, dove la fascia deve essere aumentata, rispettivamente, a 34 m e a 85 m.

Figura 6 - Inviluppo linee a 3  $\mu$ T a 30 m



## 5. ANALISI DEI RICETTORI

Si è proceduto a sovrapporre il tracciato della nuova linea 132 kV di potenziamento della linea esistente 132 kV "Codigoro-Ariano" con le rispettive DPA come precedentemente calcolate su ortofoto. Dalla comparazione tra DPA (fascia magenta), ortofoto e catasto sono stati individuati i ricettori che potevano presentare un superamento del valore di qualità in seguito all'installazione di nuovi sostegni (Figura 7).

In Figura 8 si riporta, su base catastale, il dettaglio della nuova linea 132 kV tra la SE Fiscaglia e la CP Ariano. Si evince che non vi sia interferenza tra la linea in progetto e i ricettori sensibili collocati lungo il tracciato stesso.

Inoltre, come illustrato nel § 4.4, in corrispondenza dell'intersezione della campata P10A-P11A con la linea esistente a 380 kV "Porto Tolle – Ravenna Canala" non vi è interferenza con ricettori sensibili, i quali si collocano al di fuori delle DPA calcolate (Figura 6).



Figura 7 - Ortofoto con indicazione delle DPA



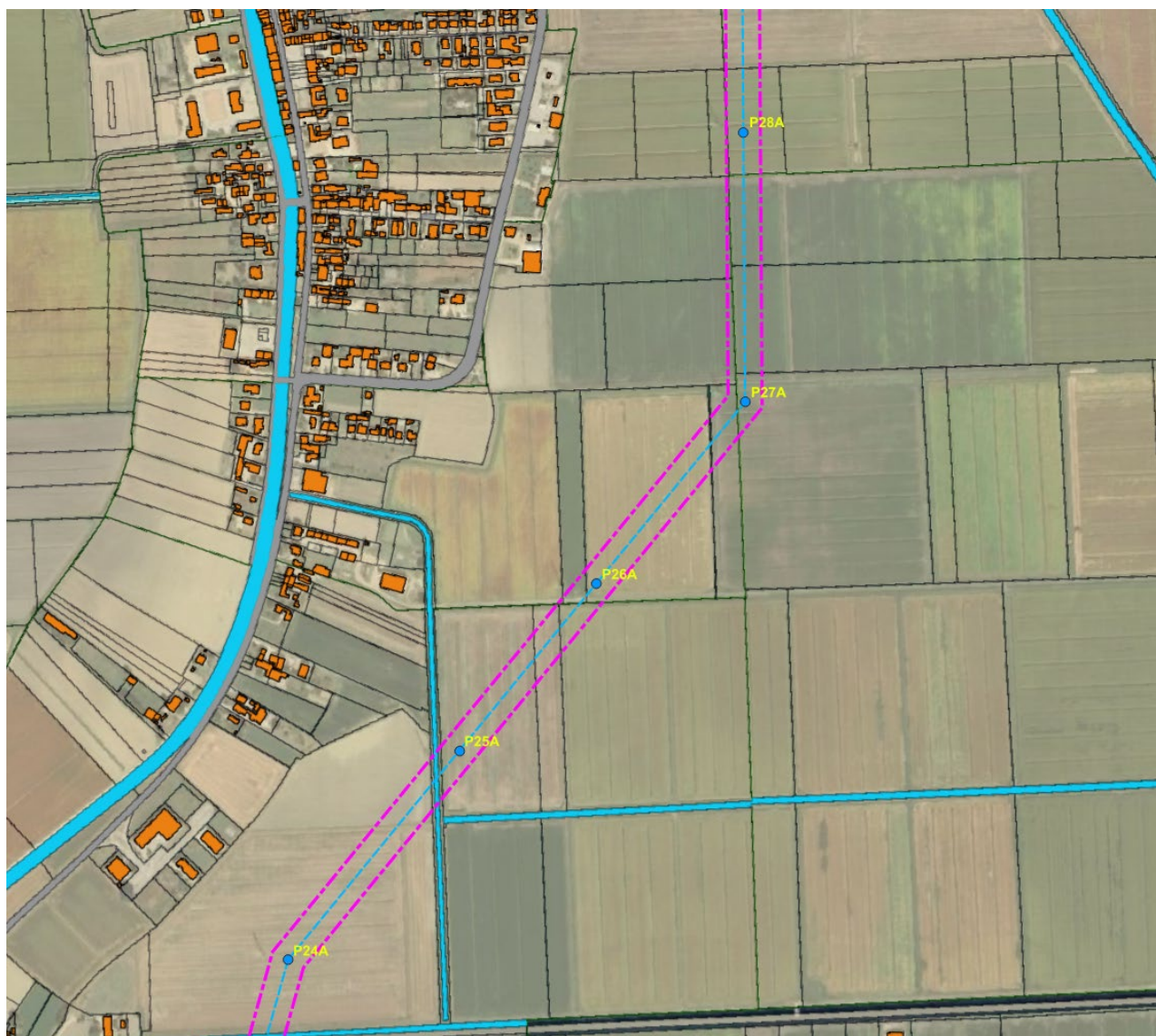


















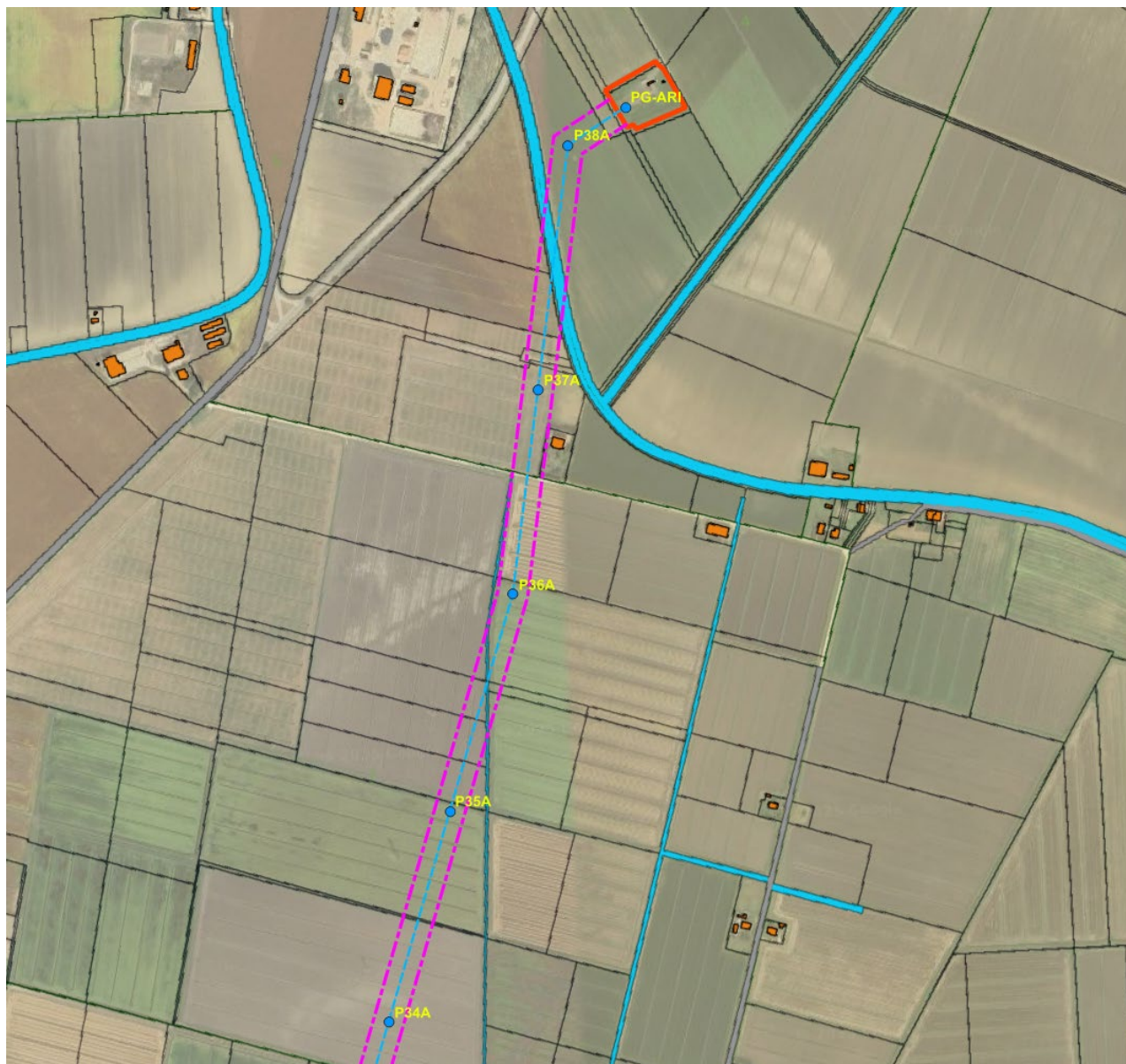


Figura 8 - Individuazione ricettori sensibili su base catastale

### 5.1 Schede ricettori sensibili

Per quanto riportato nel §5, data la non presenza di ricettori sensibili all'interno delle DPA come precedentemente calcolate, non si è proceduto alla compilazione delle apposite schede.

## 6. 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 5 kV/m per il campo elettrico e 100  $\mu$ T, 10  $\mu$ T e 3  $\mu$ T per il campo magnetico 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 le DPA che garantiscano a chiunque rimanga all'esterno il rispetto del valore di qualità, 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 dal potenziamento della linea 132 kV "Codigoro-Ariano".

Dalle simulazioni effettuate si osserva che a 1,5 m dal sono sempre rispettati i limiti di esposizione fissati dal DM 8/07/2003 per il campo elettrico e magnetico.

I calcoli effettuati in base a quanto stabilito dal DM 29 Maggio 2008, hanno permesso di determinare la ampiezza della Distanza di Prima approssimazione pari a **22 metri** da applicare dall'asse della nuova linea 132 kV in progetto. In corrispondenza dei sostegni P10A e P11A si è proceduto alla valutazione dell'effetto combinato dovuto all'intersezione della linea 132 kV in progetto con la linea 380 kV "Porto Tolle – Ravenna Canala".

Come si evince dall'analisi dei ricettori precedentemente riportata, e dal documento 510824 – Corografia con distanze di prima approssimazione, non sono presenti ricettori sensibili all'interno delle DPA.

**Allegato 1: Documento di Validazione**



## Documento di Validazione

### Algoritmi di calcolo del software MAGIC<sup>®</sup> (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 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.

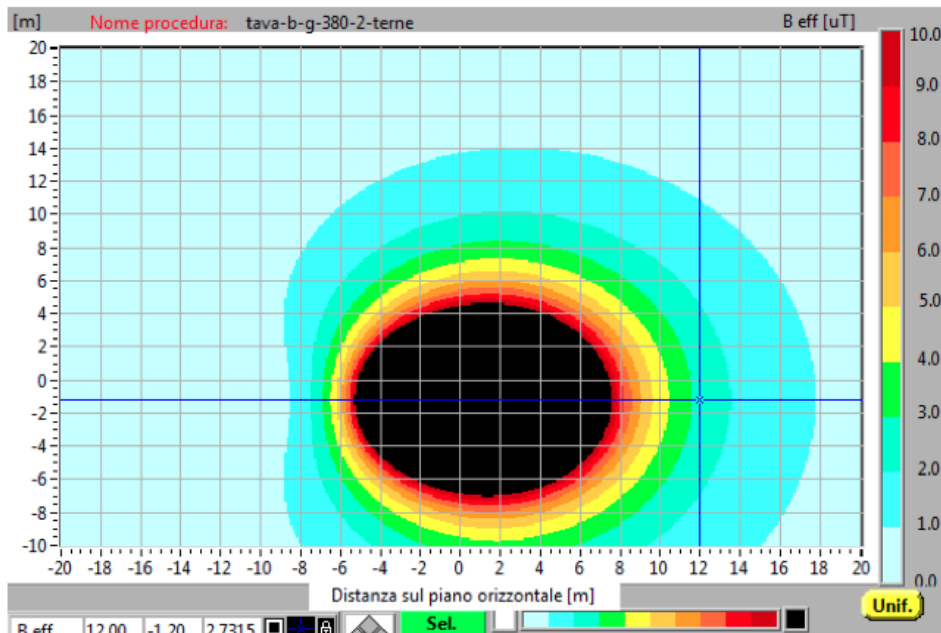
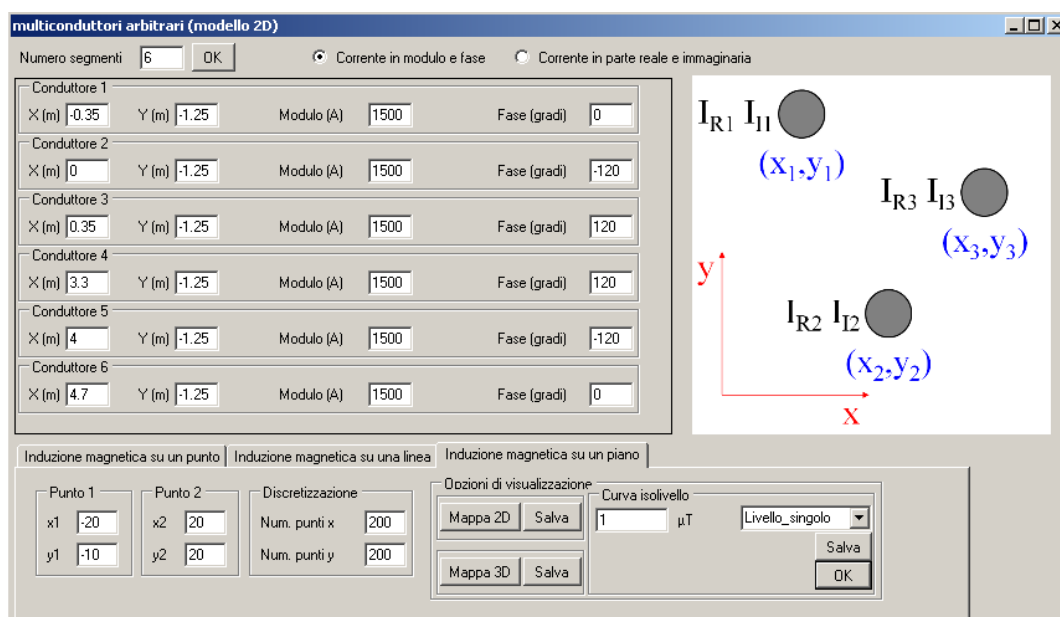


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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

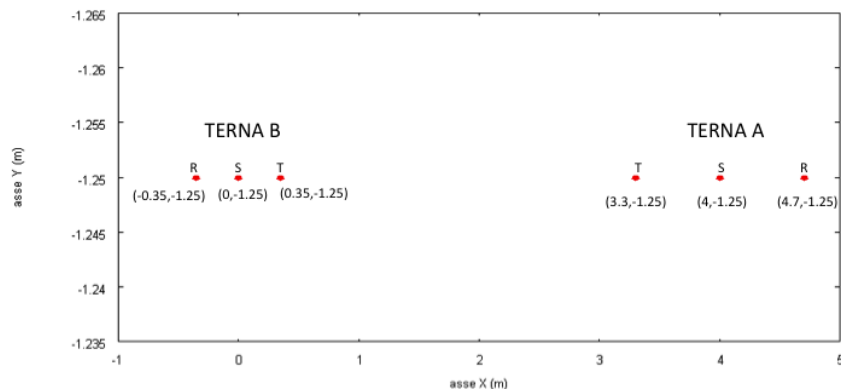
- Terne parallele
- Multiconduttori 2D

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.



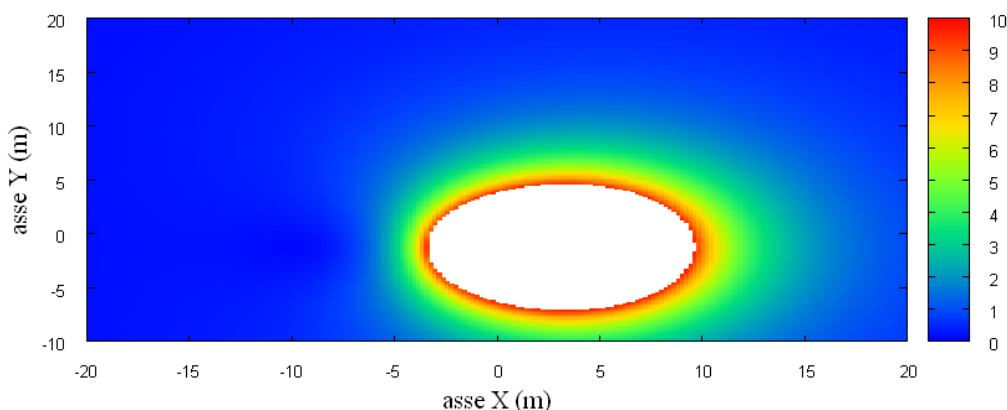
**Figura 4:**Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)””: dati definizione geometria e sorgenti

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



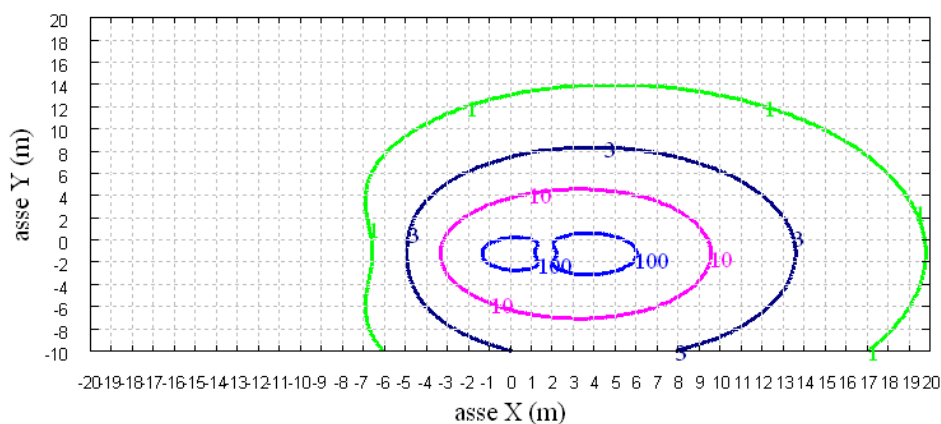
**Figura 5:** Geometria sorgenti

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®.



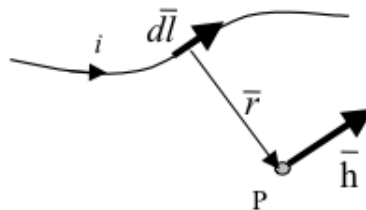
**Fig. 7** Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

**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:

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



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.

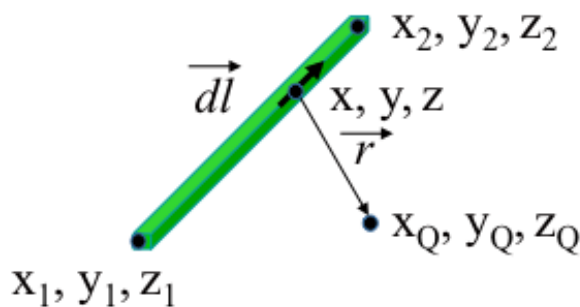


Fig. 8: Modello del segmento.

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

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

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

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

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.

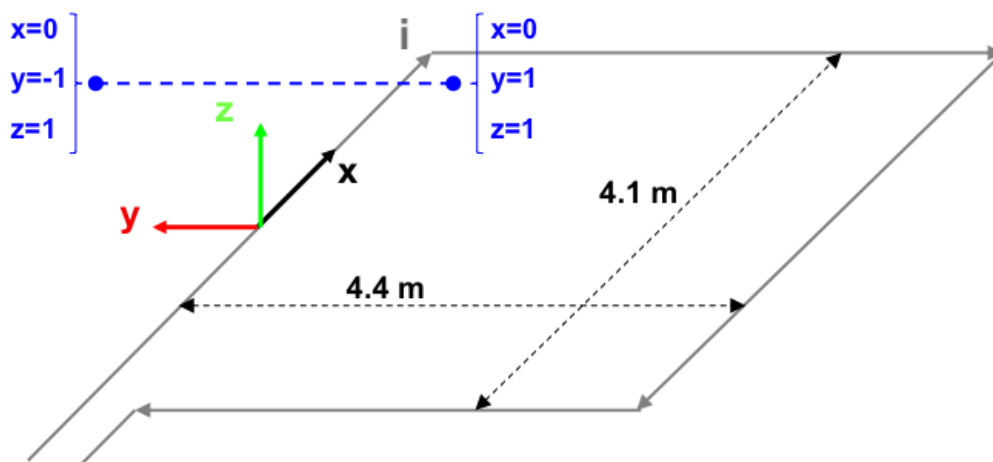


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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  $y$  →  $x = \text{costante} = 0 \text{ m}$
- E' lunga due metri: →  $y \text{ minimo} = -1 \text{ m}$ ,  $y \text{ massimo} = 1 \text{ m}$

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

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

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

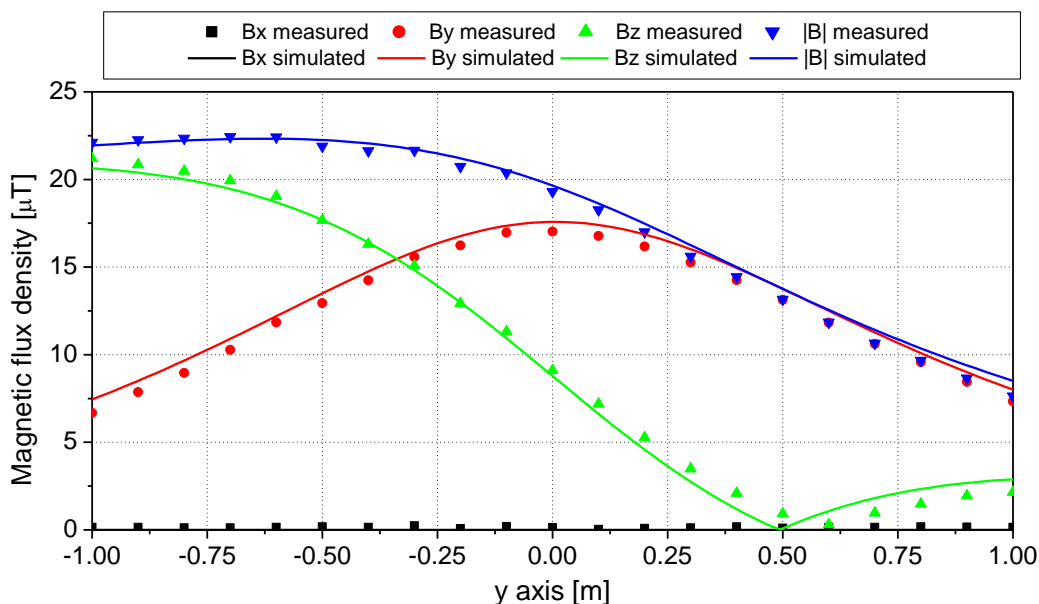


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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

### 3 Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza

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

La validazione è condotta in due step:

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

Maggiore dettaglio sui confronti sono riportati nella seguente referenza:

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

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

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

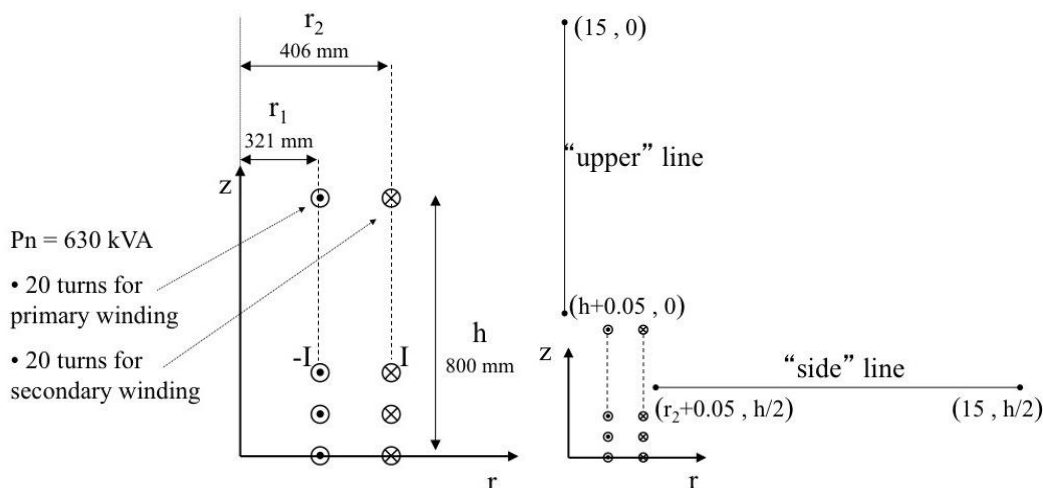


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

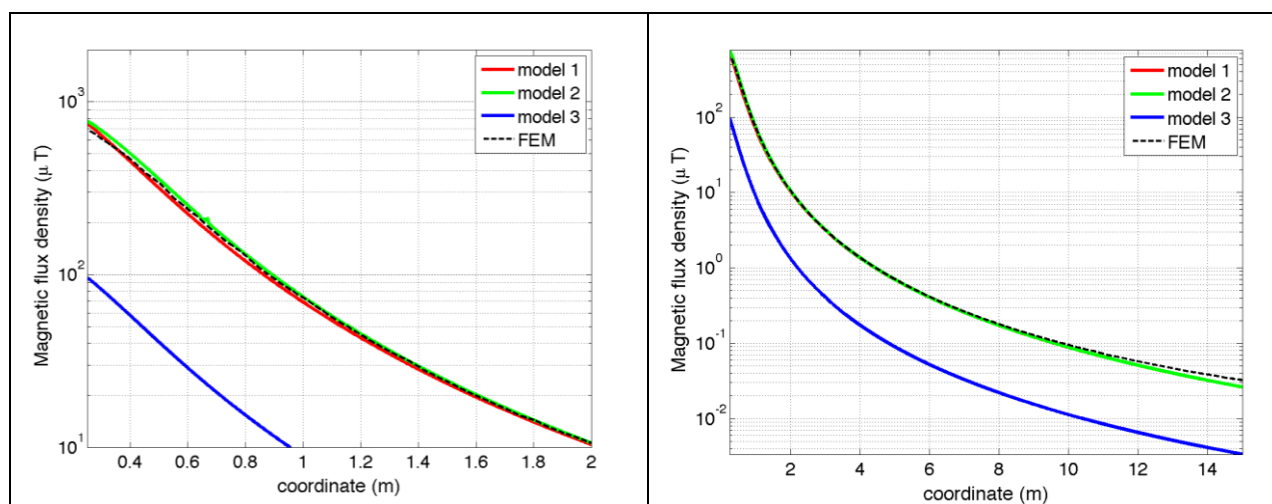
Le Fig. 12 e 13 mostrano, rispettivamente, i valori di induzione magnetica lungo la linea ad 1m dal lato degli avvolgimenti e lungo la linea ad 1.5 m sopra gli avvolgimenti. Le figure mettono a confronto il “modello 1 e 2” ed il calcolo, assunto come riferimento, effettuato mediante codice FEM.

**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).**

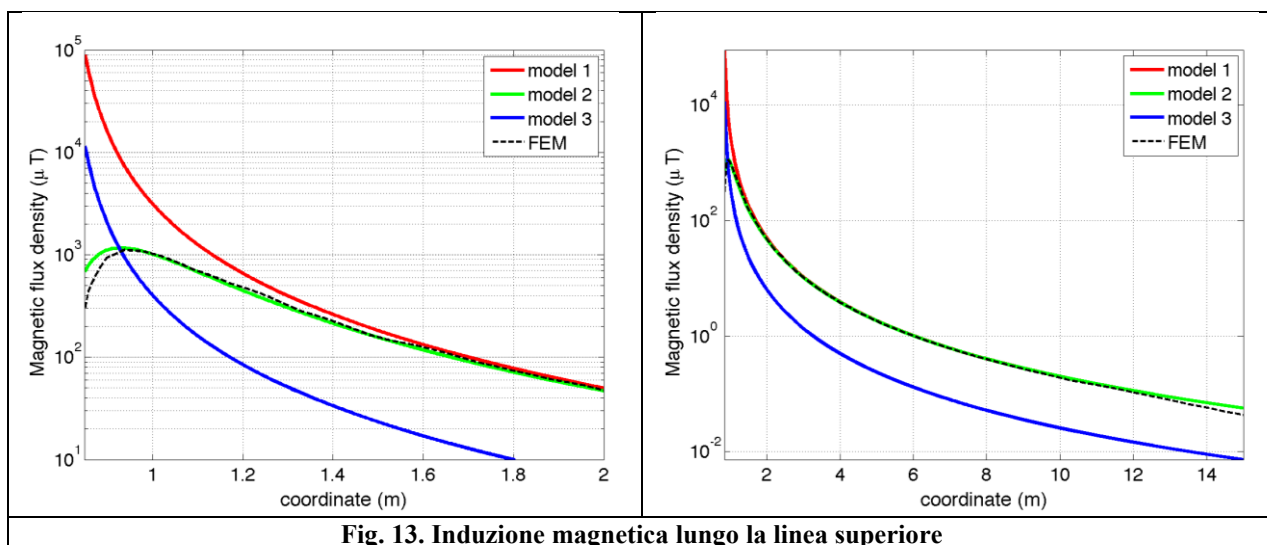
I modelli inseriti nel MAGIC® sono inoltre confrontati con il modello proposto da un altro software commerciale (EFC-400) che verrà denominato “Modello 3”. Tale modello è basato sull’ipotesi che il campo magnetico disperso, essendo correlato con la reattanza di dispersione del trasformatore, risulta 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.**

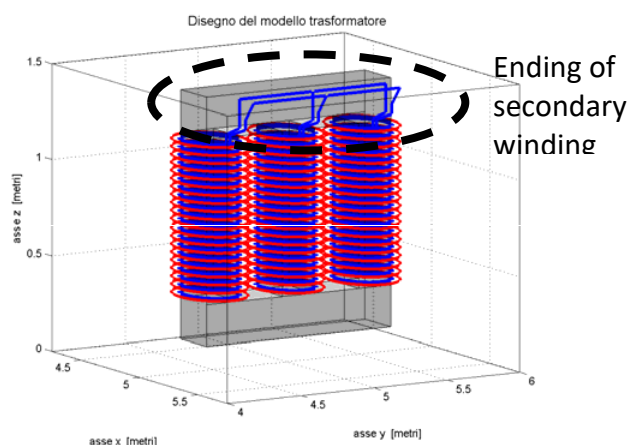


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate al lati BT.

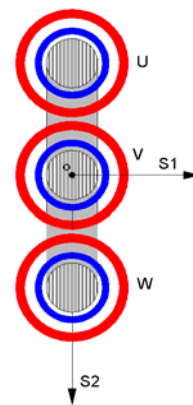


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

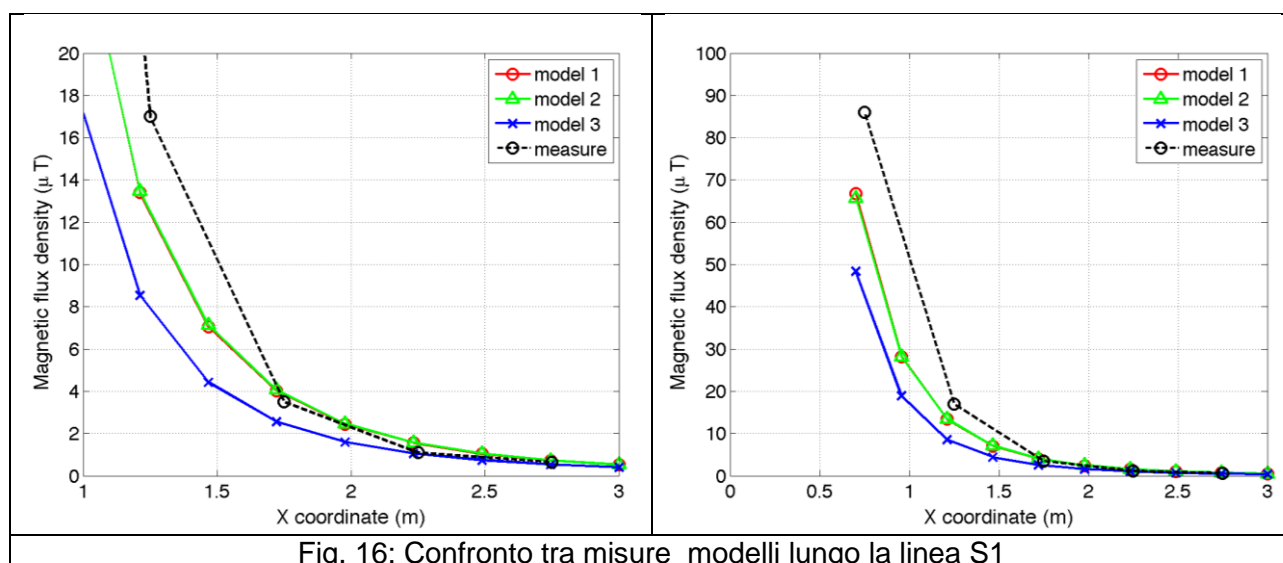


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1



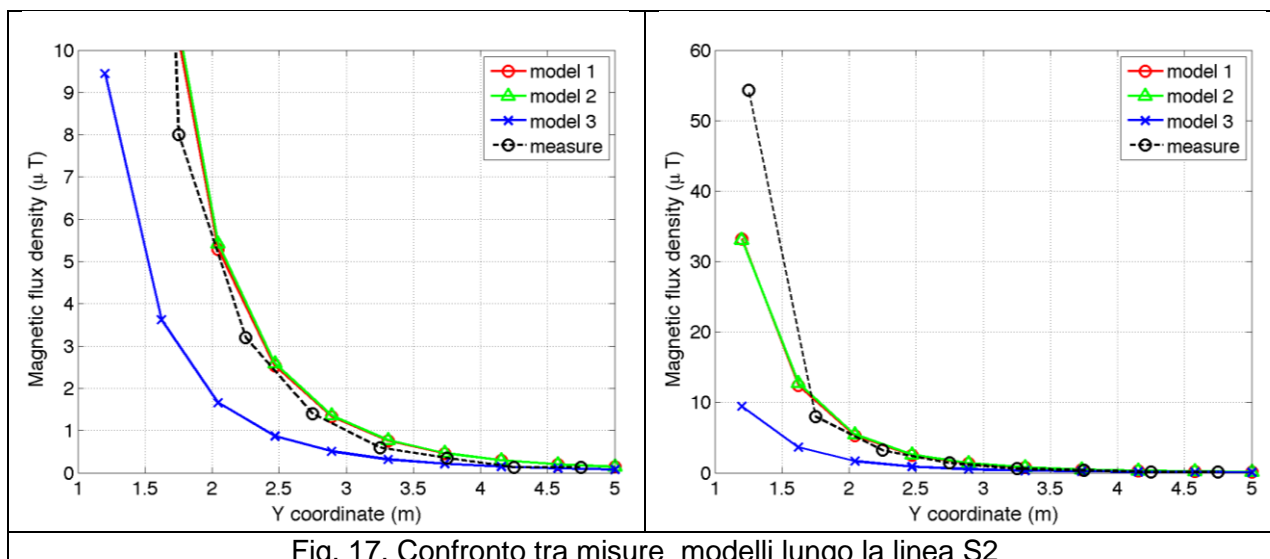


Fig. 17. Confronto tra misure e modelli lungo la linea S2

## Conclusioni

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

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

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