

| | | <i>Bertani</i> | <i>Bolognesi</i> | <i>Brygnoni</i> | |
|---|----------|----------------|------------------|-----------------|---|
| A | 28/01/22 | Bertani | Bolognesi | Brygnoni | Emissione per autorizzazione |
| REVISIONE | DATA | ELABORATO | VERIFICATO | APPROVATO | DESCRIZIONE |
| COMMITTENTE  <small>juwi development 09 s.r.l.</small> | | | | | IMPIANTO PUNTO DI RACCOLTA CASCINA BARAGGIA |
| INGEGNERIA & COSTRUZIONI  | | | | | TITOLO RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI |
| SCALA | FORMATO | FOGLIO / DI | | N. DOCUMENTO | |
| - | A4 | 1 / 26 | | 3 5 3 0 4 A | |

SOMMARIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | PREMESSA | 3 |
| 2 | QUADRO NORMATIVO | 3 |
| 3 | CALCOLO DEL CAMPO MAGNETICO..... | 4 |
| 3.1 | Correnti di calcolo..... | 7 |
| 3.2 | Risultati..... | 8 |
| 4 | CONCLUSIONI | 12 |

1 PREMESSA

Il progetto di cui tratta la presente relazione è relativo ad una stazione elettrica 132 kV denominata punto di raccolta "Cascina Baraggia", destinata a ricevere l'energia prodotta da diversi impianti alimentati da FER, e del collegamento in cavo AT interrato della sezione di 1.600 mm² che conetterà poi il presente punto di raccolta con la futura SE 380/132 kV Carisio di Terna. In questo modo, diversi impianti occuperanno un solo stallo sulla stazione RTN, in grado di connettere potenze per 200 MVA.

L'opera, nel suo complesso, è quindi funzionale a consentire l'immissione nella RTN in alta tensione dell'energia prodotta da diversi impianti di produzione energia. Gli impianti si potranno connettere sia in media tensione che in alta tensione con il punto di raccolta Cascina Baraggia: gli impianti attualmente in essere si conetteranno, per l'utente Juwi Development 09 in alta tensione, per cui per impianto è previsto un arrivo in cavo AT; il secondo utente Enfinity Solare sarà connesso in MT e tramite una trasformazione MT/AT in sito si collegherà alla sbarra comune, per futuri impianti che dovessero arrivare in MT, sono disponibili aree per realizzare il relativo stallo di trasformazione MT/AT nel punto di raccolta.

Come detto, al punto di raccolta potranno essere collegati fino a 5 utenti, ma nella prima fase l'impianto sarà progettato per accogliere 2 utenti, in quanto questi sono quelli comunicati da Terna a valle della richiesta con modello 4a/bis. Vi è poi la possibilità di collegare ulteriori utenti, per raggiungere tale valore di potenza.

Nella presente relazione verranno calcolati i soli campi magnetici prodotti dal cavidotto in alta tensione e dal Punto di Raccolta "Cascina Baraggia". I campi elettrici e magnetici prodotti dalla stazione "Carisio" e dai raccordi a 380 kV alla rete elettrica nazionale sono riportati nel documento 35404 – SE 380/132kV Carisio – Relazione campi elettrici e magnetici.

2 QUADRO NORMATIVO

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

In particolare la Legge Quadro No. 36 del 22 Febbraio 2001 "*Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici*" ha lo scopo di assicurare la tutela della salute dei lavoratori, delle lavoratrici e della popolazione dagli effetti dell'esposizione a determinati livelli di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici e di assicurare la tutela dell'ambiente e del paesaggio promuovendo l'innovazione tecnologica.

Con i successivi decreti attuativi, DPCM 8 Luglio 2003, sono stati fissati i livelli di esposizione, di attenzione e l'obiettivo di qualità da rispettarsi al fine della tutela della salute della popolazione.

Nella tabella 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.

Tabella 1 - valori come da normativa in vigore

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

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

Le opere facenti parte del progetto in esame hanno la funzione di connettere diversi produttori di energia elettrica da fonti rinnovabili alla rete elettrica nazionale, che è esercita alla frequenza di 50 Hz. A questa frequenza i campi elettrici e magnetici generati dagli elettrodotti e dalle opere ad essi connesse 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". Inoltre il limite di esposizione del campo elettrico risulta sempre rispettato esternamente alla recinzione della stazione.

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

Le linee guida elaborate da Enel ricordano che al punto 5.2 dell'allegato al Decreto 29 maggio 2008 (GU n. 156 del 5 luglio 2008) si stabilisce che generalmente per le Stazioni Primarie, la DPA rientra nel perimetro dell'impianto (§ 5.2.2) in quanto non vi sono livelli di emissione sensibili oltre detto perimetro. Sempre nelle stesse linee guida si specifica che per le Cabine Primarie la DPA è sicuramente interna alla cabina se sono rispettate le seguenti distanze dal perimetro esterno, (escludendo le fasce di rispetto delle linee in ingresso/uscita):

- 14 m dall'asse delle sbarre di AT in aria;
- 7 m dall'asse delle sbarre di MT in aria.

Il punto di raccolta, come caratteristiche costruttive rientra all'interno della tipologia delle Cabine Primarie, e ha uno schema standard composto da una sbarra AT in aria a cui sono connessi tre stalli utente collegati a loro volta a diversi produttori e alla linea in cavo AT comune. I due produttori ad oggi afferenti alla cabina sono connessi

rispettivamente in alta e media tensione pertanto solo lo stallo dell'utente Enfinity Solare sarà dotato di trasformatore. La fase esterna dello stallo AT più vicino alla recinzione è posto a 8,8 m dal perimetro esterno della cabina.

Si è quindi proceduto effettuando il calcolo teorico dei livelli di campo magnetico generati separatamente dal punto di raccolta e dal cavidotto ad alta tensione. All'interno della stazione sono stati considerati solo gli elementi principali, non si è determinato il calcolo delle DPA dei cavidotti in media tensione interrati in quanto queste rimangono certamente all'interno della stazione stessa. In base ai risultati delle simulazioni sono state determinate le DPA da applicare ai singoli elementi.

Il calcolo del campo magnetico è stato effettuato utilizzando il software "Magic" di BEShielding di cui riportiamo in allegato il documento di validazione. Il software permette di calcolare i campi magnetici generati da sorgenti di tipo elettrico, quali trasformatori, sistemi di linee elettriche, cabine MT/BT, buche giunti, blindosbarre e impianti elettrici. Il software permette la determinazione delle fasce di rispetto per linee elettriche e cabine MT/BT, secondo quanto previsto dalla Legge Quadro n. 36/2001 (esposizione ai campi magnetici della popolazione) e dal D.Lgs. n. 81/08 (valutazione dei rischi in ambiente lavorativo). Permette inoltre di studiare le singole sorgenti (linee elettriche, cavi, sistemi multiconduttori, trasformatori) mediante configurazioni bidimensionali e tridimensionali attraverso l'integrazione della legge di Biot-Savart o lo studio di sistemi complessi, come le cabine elettriche MT/BT, tenendo conto della tridimensionalità delle sorgenti, della loro reale posizione e della sovrapposizione degli effetti delle diverse componenti la cabina.

In generale per poter meglio valutare a priori il valore dell'induzione magnetica nel punto di raccolta, abbiamo schematizzato la stazione con una griglia di conduttori rettilinei ortogonali fra loro, percorsi da correnti differenti a seconda della sorgente collegata a ogni tratto di linea.

Dalla planimetria riportata in figura 1 e dalle sezioni riportate in figura 2, possiamo osservare che gli elementi in tensione sono costituiti dagli stalli utenti, dalla sbarra comune e dallo stallo linea in cavo AT comune.

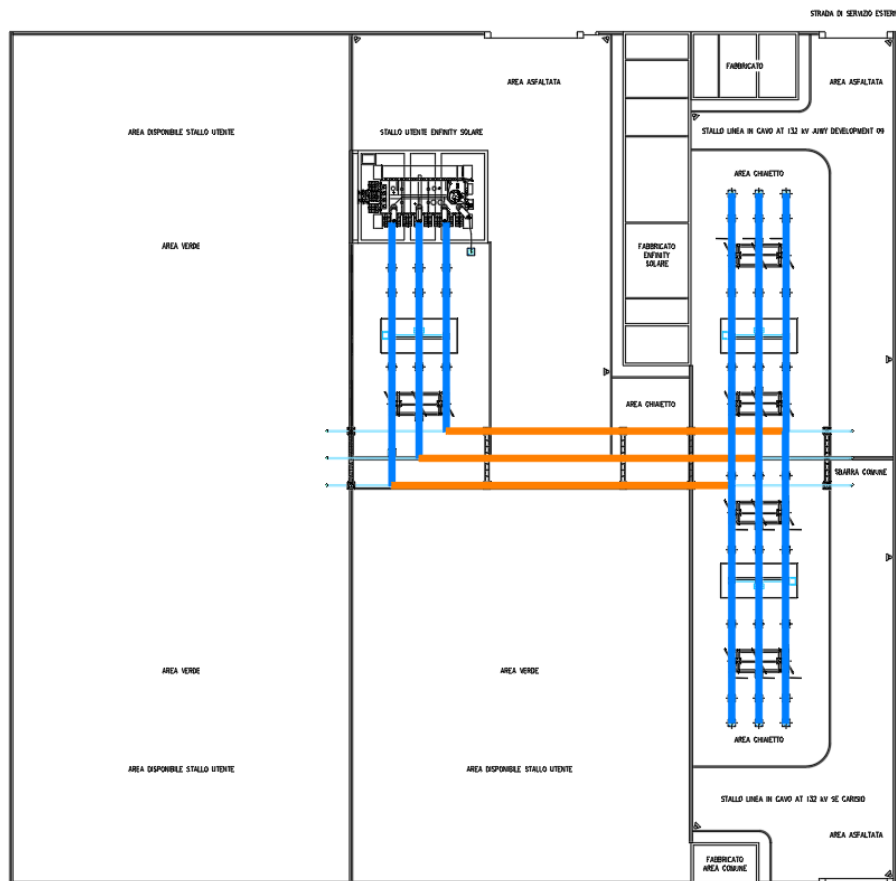


Figura 1 – Planimetria del punto di raccolta con individuazione degli elementi attivi

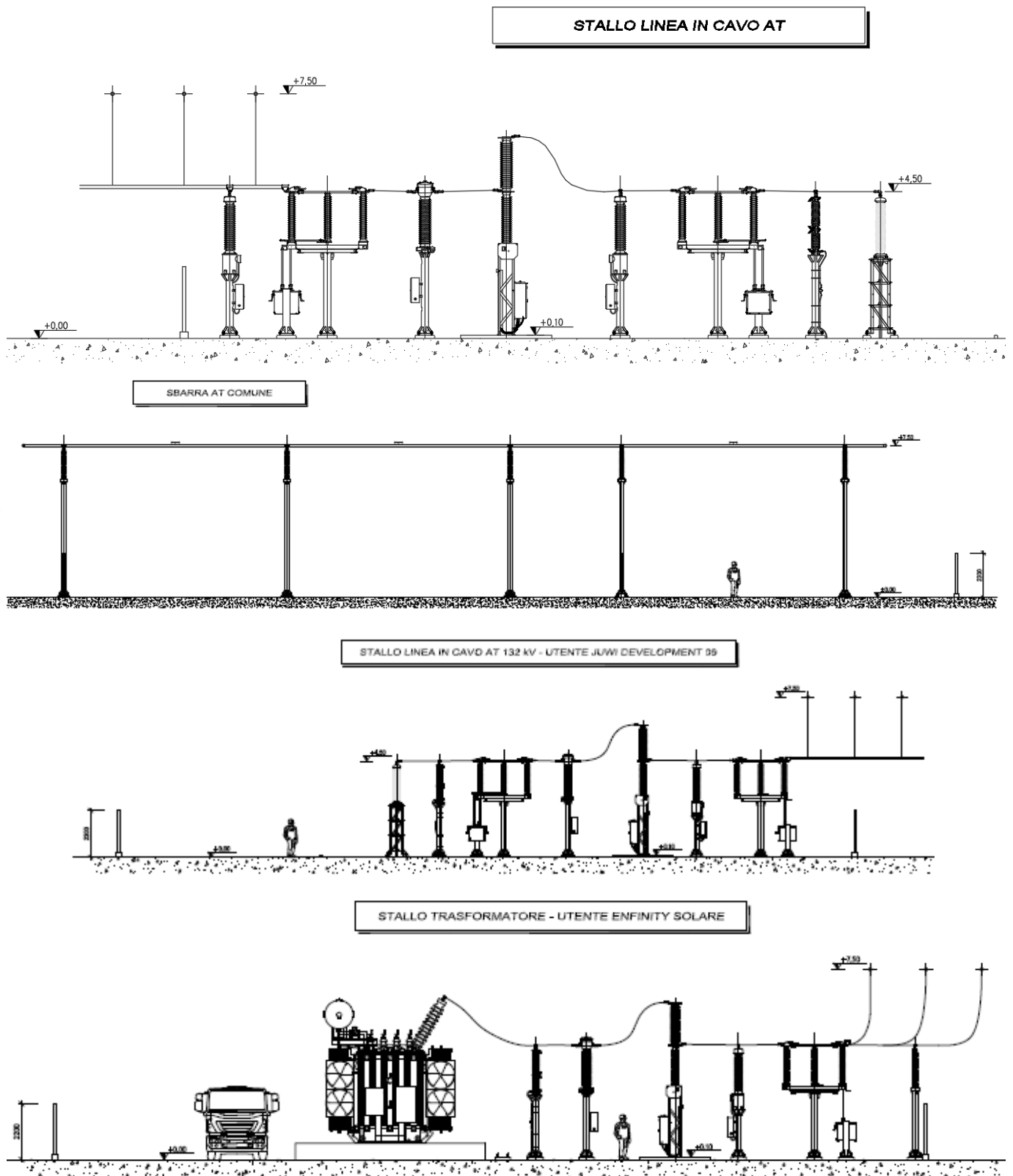


Figura 2 – Sezioni del punto di raccolta con individuazione delle altezze

Primo passo per realizzare il calcolo dei livelli di campo magnetico è individuare la geometria della stazione, schematizzandola come nella figura 1. In arancione è riportato la sbarra, in blu gli stalli utenti e lo stallo linea. I collegamenti dagli stalli alla sbarra sono considerati come conduttori verticali.

Il punto di origine (0;0) del sistema è stato definito all'estremità inferiore sinistra (Figura 1) della recinzione dell'impianto.

Nella figura seguente è riportata la schematizzazione come risulta all'interno del programma di calcolo.

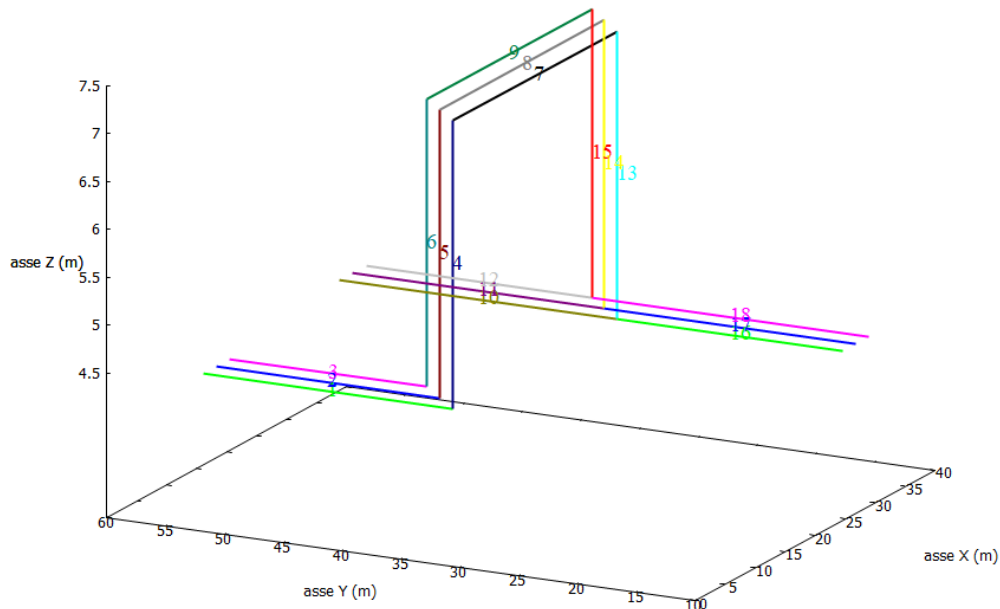


Figura 3 – Schematizzazione degli elementi attivi all'interno del programma di calcolo

3.1 Correnti di calcolo

Il cavidotto in alta tensione di collegamento tra il punto di raccolta "Cascina Baraggia" e la futura stazione 380/132 kV "Carisio" di Terna ha una lunghezza di 951 m e sarà realizzato tramite un cavo in alluminio di sezione pari a 1.600 mm². La portata in regime permanente risulta pari a 1100 A. Il cavo sarà interrato con configurazione a trifoglio.

All'interno del punto di raccolta sono attualmente previsti due stalli utente su cui sono connessi due produttori: un impianto fotovoltaico di proprietà di Juwi Development 09, sito in comune di Buronzo, avente potenza nominale di 80 MVA e un impianto fotovoltaico di proprietà di Enfinity Solare sito nel comune di Santhià, di potenza di connessione pari a 71,7096 MW da cui possiamo ricavare la potenza massima di 76 MVA.

La corrente di calcolo sarà determinata in base alla potenza complessiva del singolo impianto fotovoltaico; si sottolinea di come la massima potenza degli impianti è raggiunta per poche ore all'anno, in condizioni di massimo irraggiamento, e pertanto questa assunzione è ampiamente cautelativa.

In base alla potenza massima che può essere prodotta dal parco fotovoltaico è stata calcolata la corrente massima che può essere immessa sugli stalli del punto di raccolta. Nello schema seguente riportiamo le correnti di calcolo utilizzate.

| Elemento linea | Stallo | Potenza massima | Corrente di calcolo |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------|---------------------|
| Stallo cavo AT utente | FV Juwi Development 09 | 80 MVA | 350 A |
| Stallo Trasformatore utente | FV Enfinity Solare | 76 MVA | 335 A |
| Stallo cavo AT comune | SE 132/380 kV "Carisio" | -- | 1100 A |

3.2 Risultati

I valori di campo magnetico del Punto di Raccolta sono calcolati al fine di definire le ampiezze delle fasce di prima approssimazione da applicarsi al perimetro utilizzando le correnti descritte nel capitolo precedente.

Riportiamo nel seguito le mappe dei livelli di campo magnetico generati dagli elementi attivi del punto di raccolta, sul piano x-y a diverse altezze dal suolo. Successivamente riportiamo i campi magnetici prodotti dal cavo in alta tensione al di fuori del punto di raccolta.

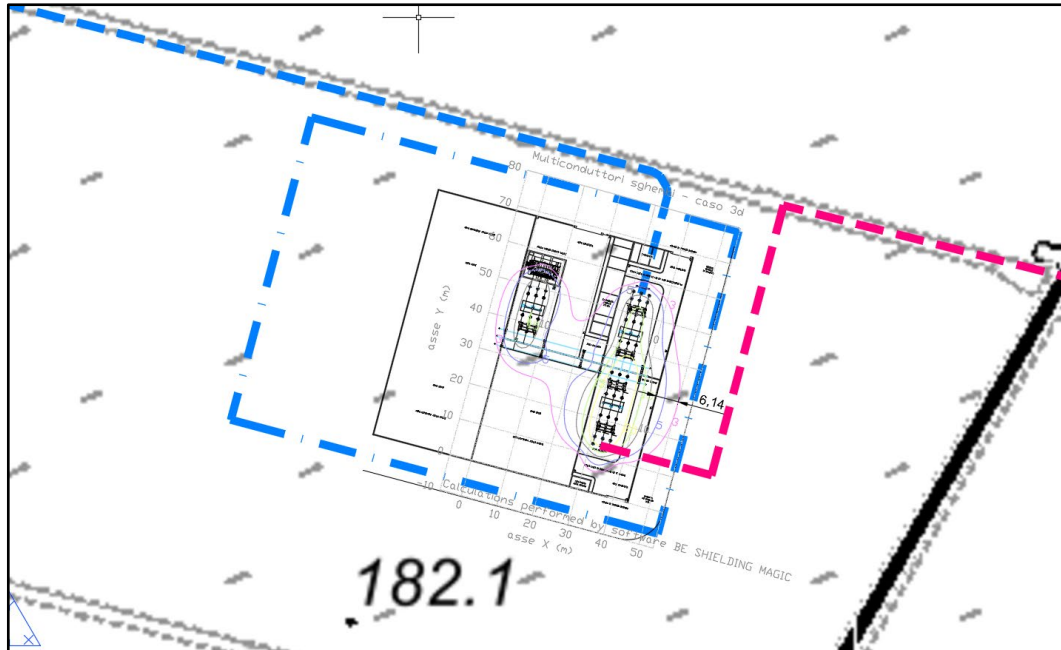


Figura 4 – Calcolo dei livelli di campo magnetico del punto di raccolta h=1m dal suolo

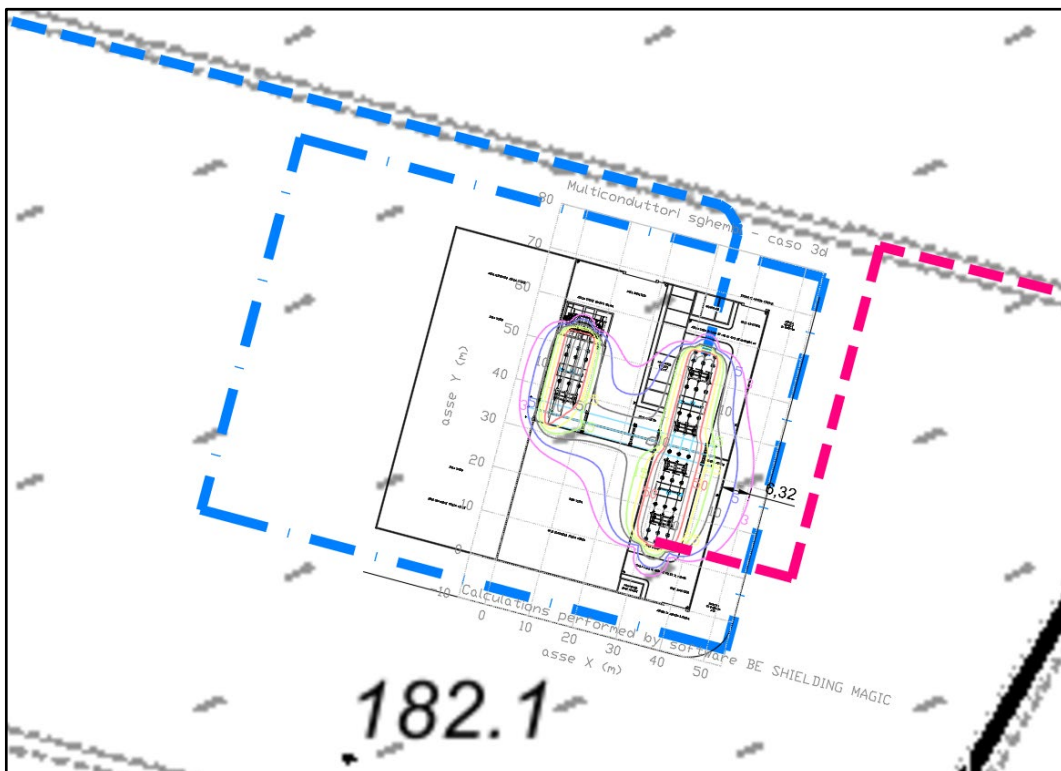


Figura 5 – Calcolo dei livelli di campo magnetico del punto di raccolta h=4 m dal suolo

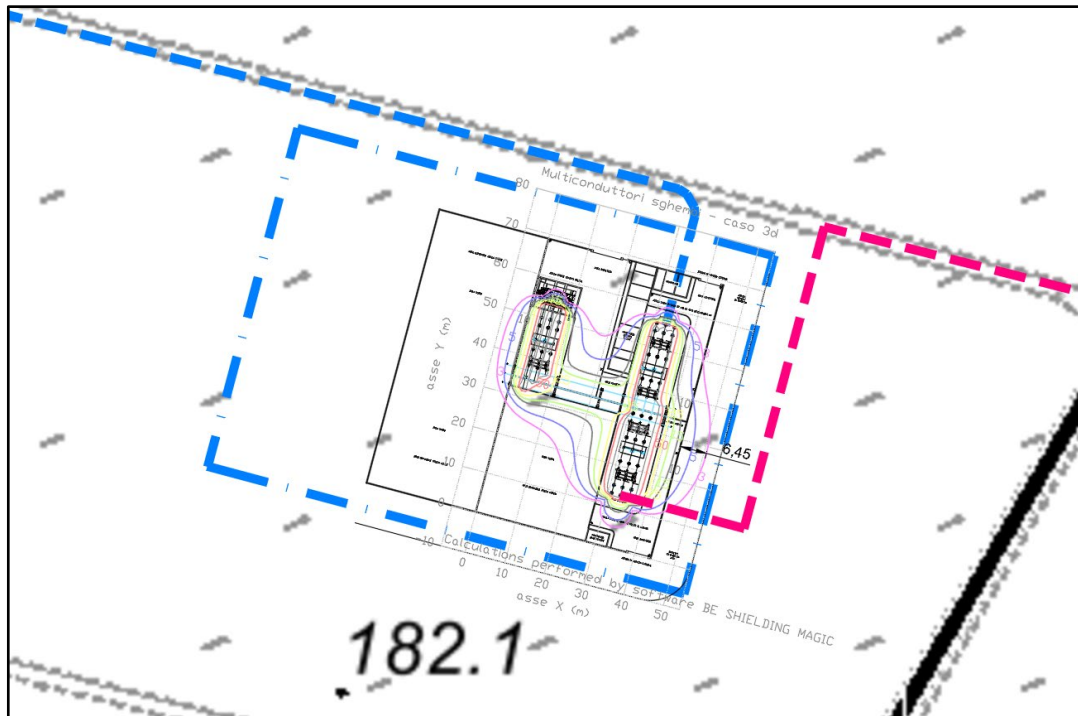


Figura 6 – Calcolo dei livelli di campo magnetico del punto di raccolta h=5 m dal suolo

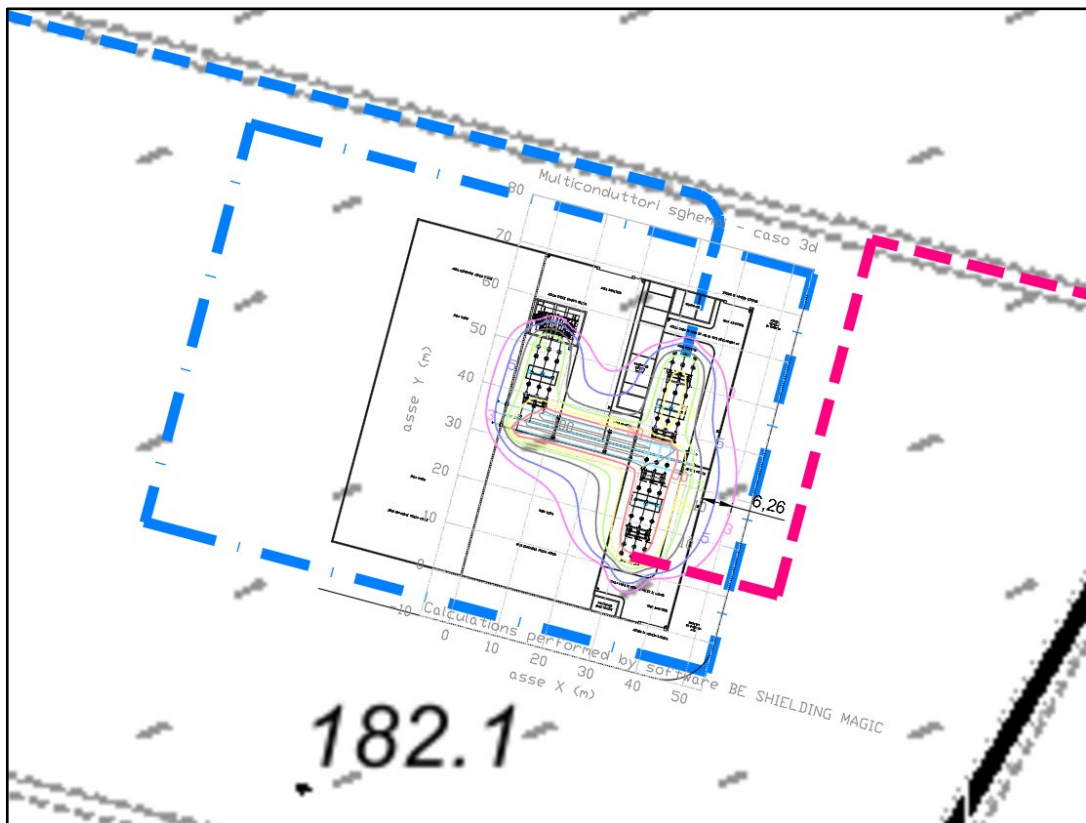


Figura 7 – Calcolo dei livelli di campo magnetico del punto di raccolta h=7 m dal suolo

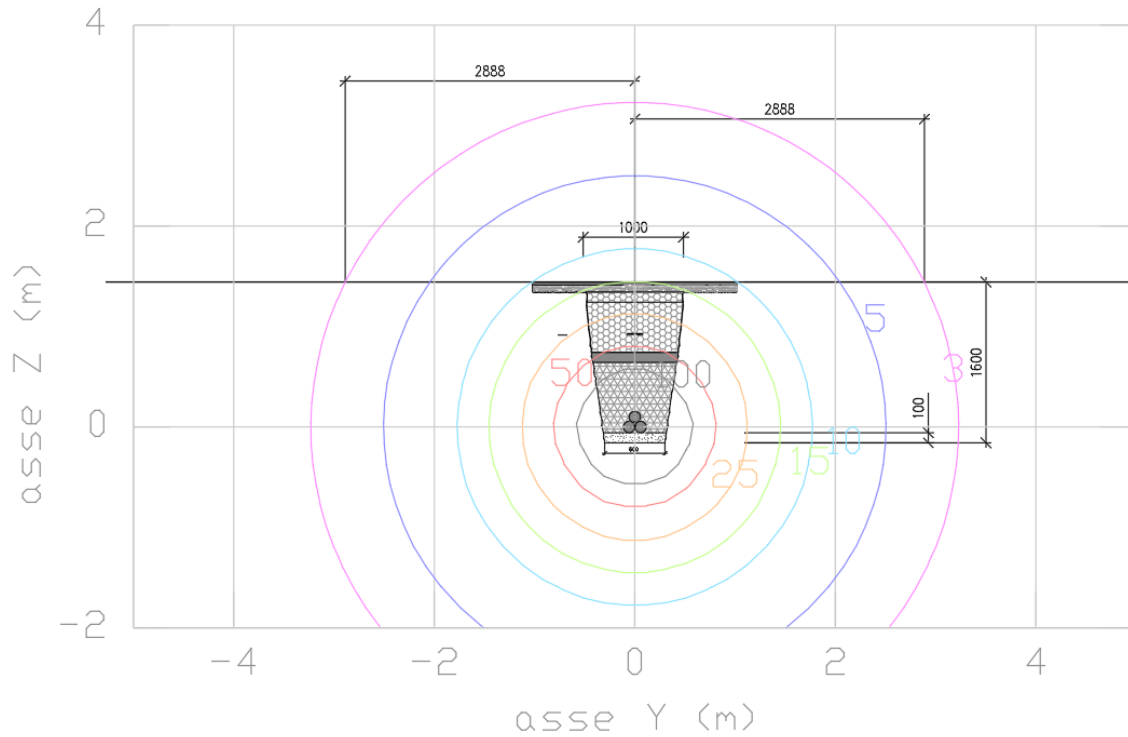


Figura 8 – Calcolo dei livelli di campo magnetico del punto di raccolta h=10 m dal suolo

Dai risultati delle simulazioni sopra riportate si evince che già a confine del punto di raccolta il campo magnetico è inferiore al valore di qualità di $3 \mu\text{T}$ ad eccezione del lato est, in prossimità dello stallo della linea AT di collegamento con la futura stazione RTN dove occorre applicare una Distanza di Prima Approssimazione di 7 metri per garantire il rispetto dello stesso. Si evidenzia che la DPA rimane all'interno del perimetro di espansione della stazione elettrica. Ricordiamo che le Dpa degli elettrodotti a media tensione collegati al punto di raccolta non sono oggetto della presente relazione.

Nel grafico sottostante riportiamo l'andamento del campo magnetico in prossimità della linea in cavo ad alta tensione di raccordo tra il Punto di Raccolta e la futura stazione RTN di Carisio. Il cavo della lunghezza di circa 685 metri risulta interrato a una profondità di 1,5 metri dal piano di campagna. Dal grafico si osserva il rispetto del valore di qualità di $3 \mu\text{T}$ sul piano di campagna a 2,8 metri dall'asse della linea: si applica pertanto una Dpa di 3 metri dall'asse della linea.

Conduttori a trifoglio



Calculations performed by software BE SHIELDING MAGIC

Figura 9 – Livelli di campo magnetico prodotti dal cavidotto AT interrato

4 CONCLUSIONI

Il DPCM 8 Luglio 2003 fissa i limiti di esposizione per la popolazione ai campi elettrici e magnetici generati da elettrodotti alla frequenza di rete (50Hz). Tali limiti sono pari a $100 \mu\text{T}$, $10 \mu\text{T}$ e $3 \mu\text{T}$ 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.

La stazione in oggetto ha la funzione di punto di raccolta per l'energia prodotta da un totale attualmente di due produttori da fonti rinnovabili e la connessione alla rete elettrica nazionale, tramite un elettrodotto AT interrato, collegato alla futura Stazione Elettrica 380/132 kV Carisio di proprietà di Terna.

Dalle simulazioni effettuate, nonché dalle linee guida sul calcolo delle fasce di prima approssimazione è stato rilevato il rispetto del valore di qualità di $3 \mu\text{T}$ già sul perimetro del punto di raccolta ad eccezione del lato est, in adiacenza allo stallo in cavo AT comune, dove occorre applicare una Distanza di Prima Approssimazione di 7 metri. Occorre inoltre applicare una Dpa di 3 metri dall'asse del cavidotto AT comune interrato. Nella figura sottostante sono riportate in azzurro le Dpa applicate sia al punto di raccolta che al cavidotto AT; le stesse sono riportate nel documento 35321 - Piano particellare.

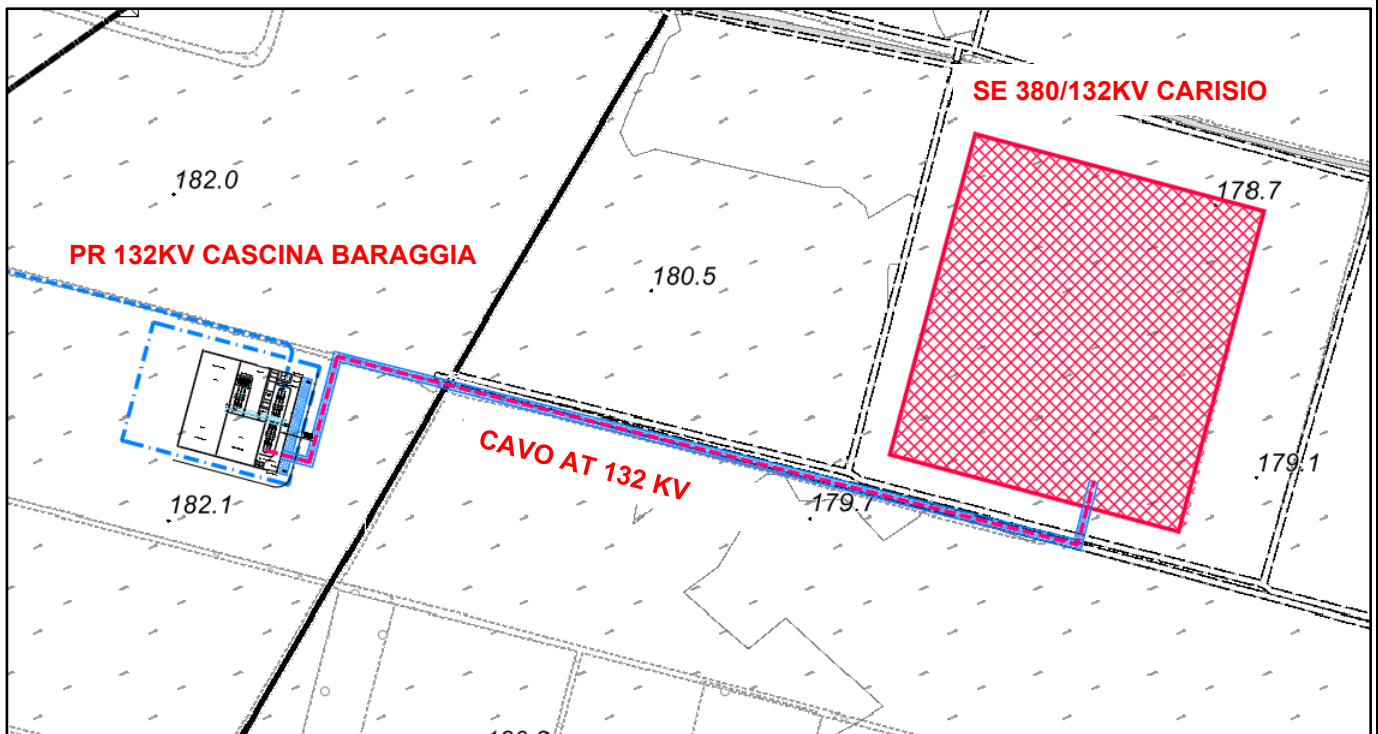


Figura 10 – Planimetria della Cabina Utente con indicazione della DPA

Allegato 1: Documento di Validazione



Documento di Validazione

Algoritmi di calcolo del software **MAGIC**[®] (**MAG**netic 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.

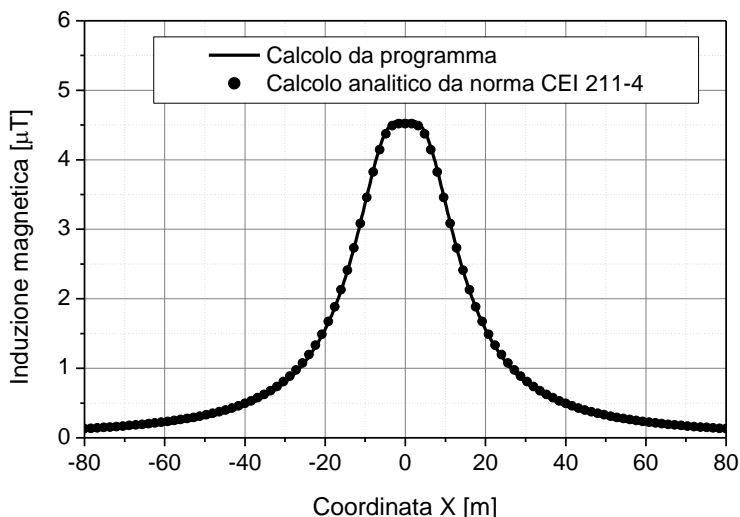


Figura 1: Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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

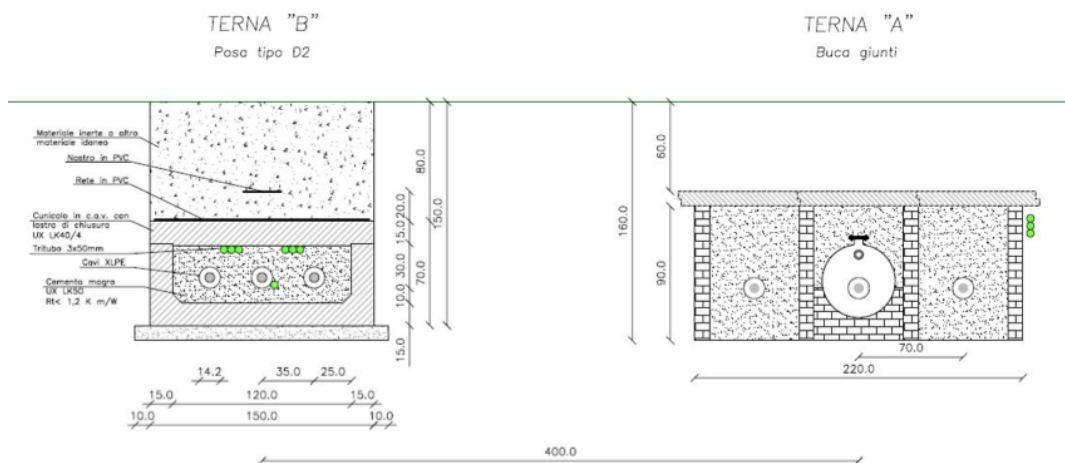


Figura 2: Affiancamento tra due linee interrate AT

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.

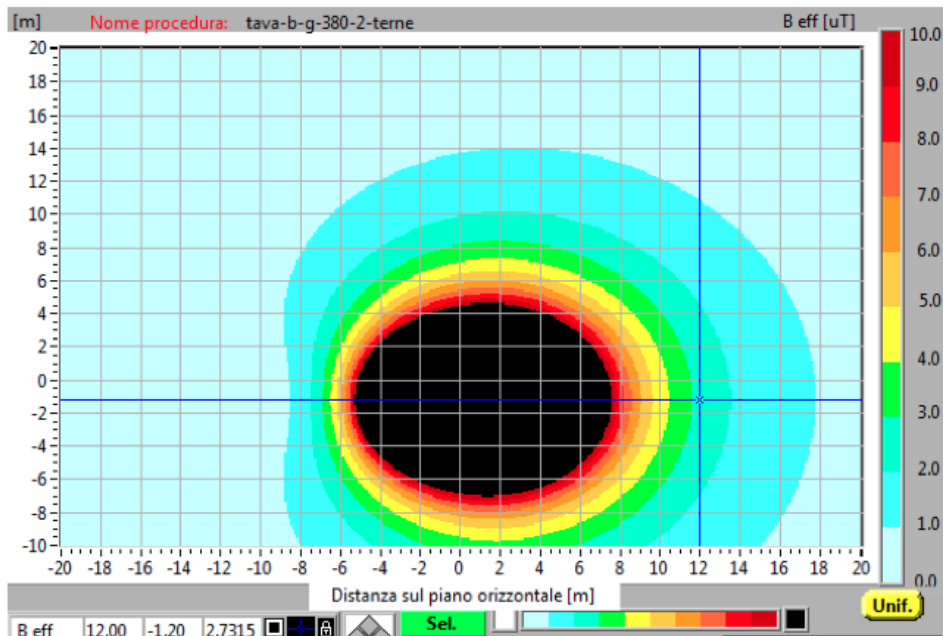


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.

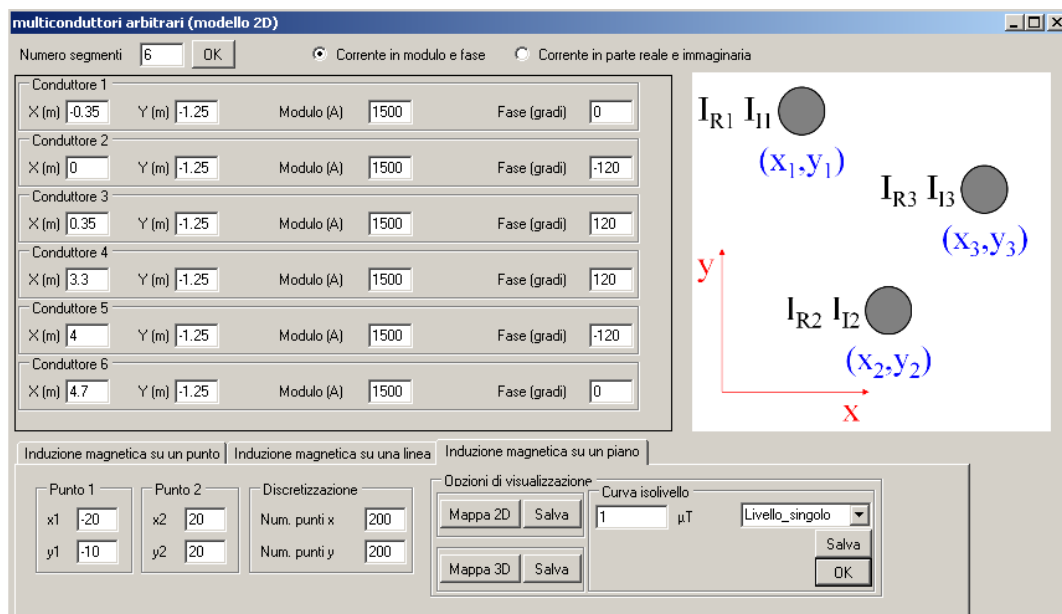


Figura 4:Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)””: dati definizione geometria e sorgenti

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

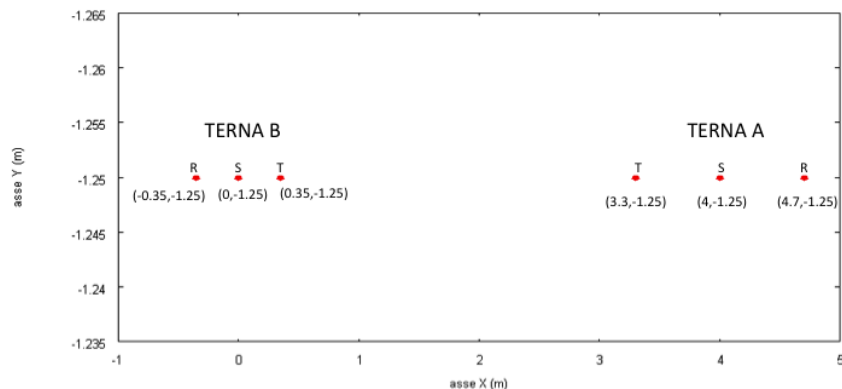


Figura 5: Geometria sorgenti

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

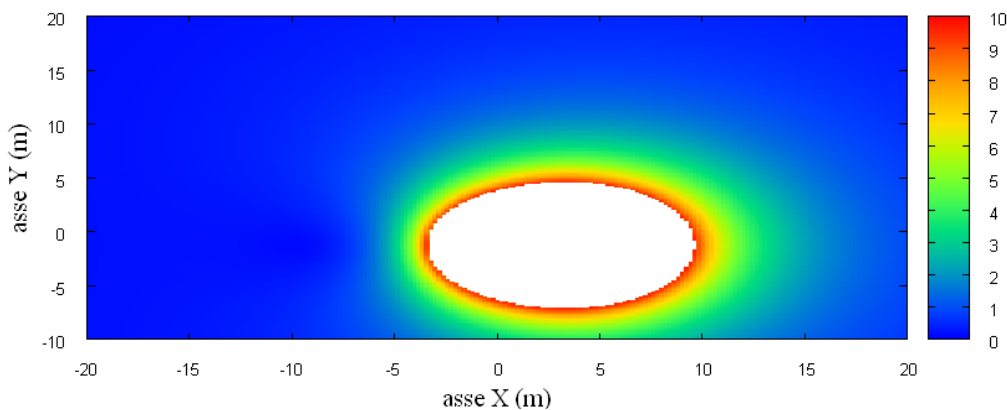


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

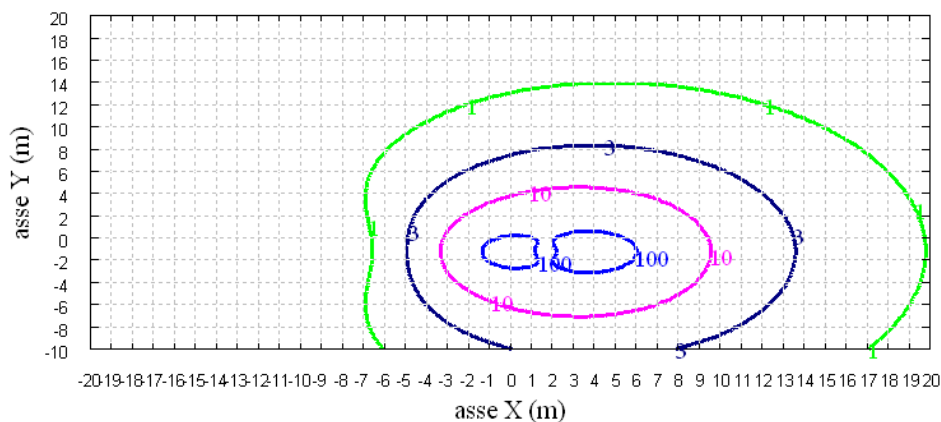
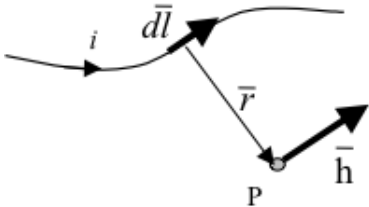


Fig. 7 Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

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.

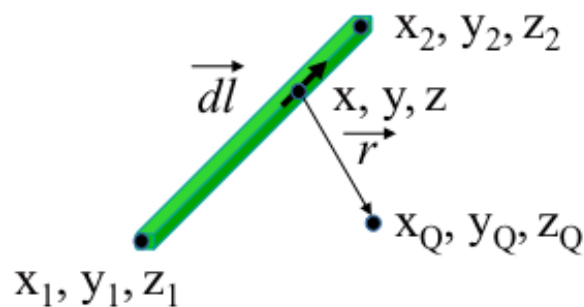


Fig. 8: Modello del segmento.

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.

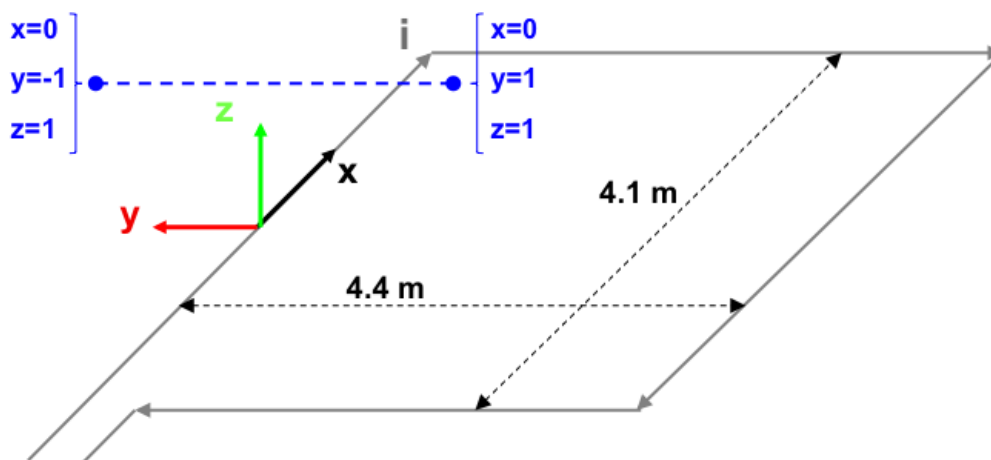


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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.

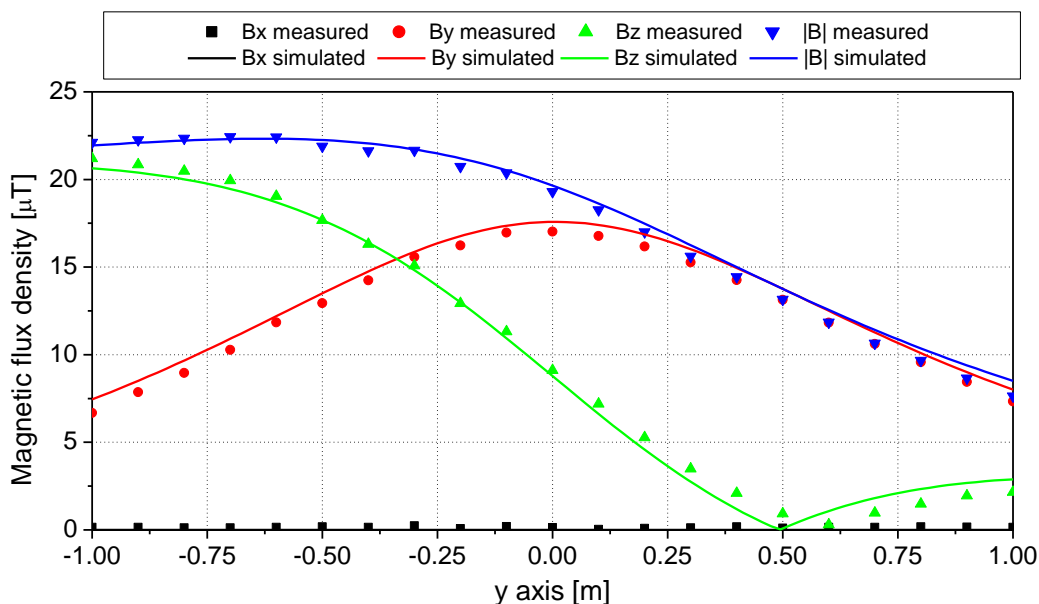


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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.

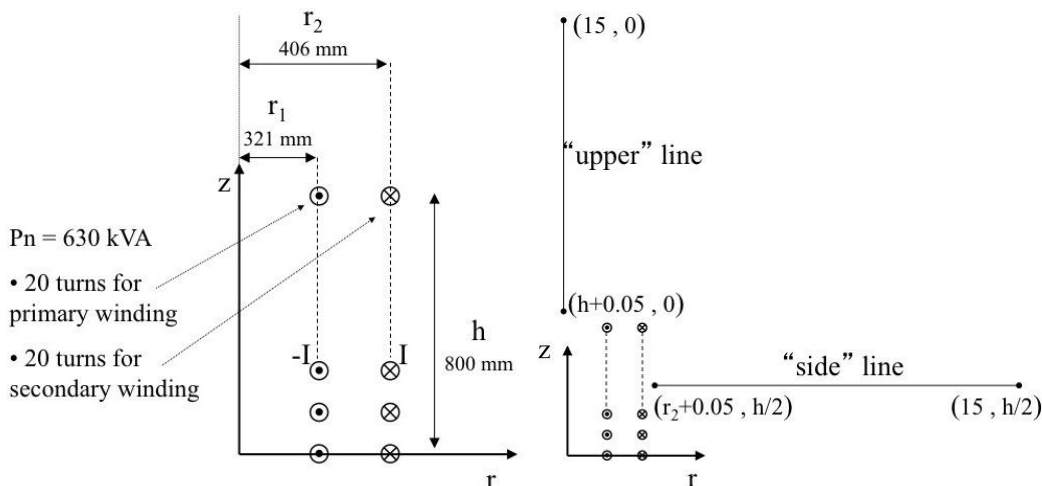


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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).

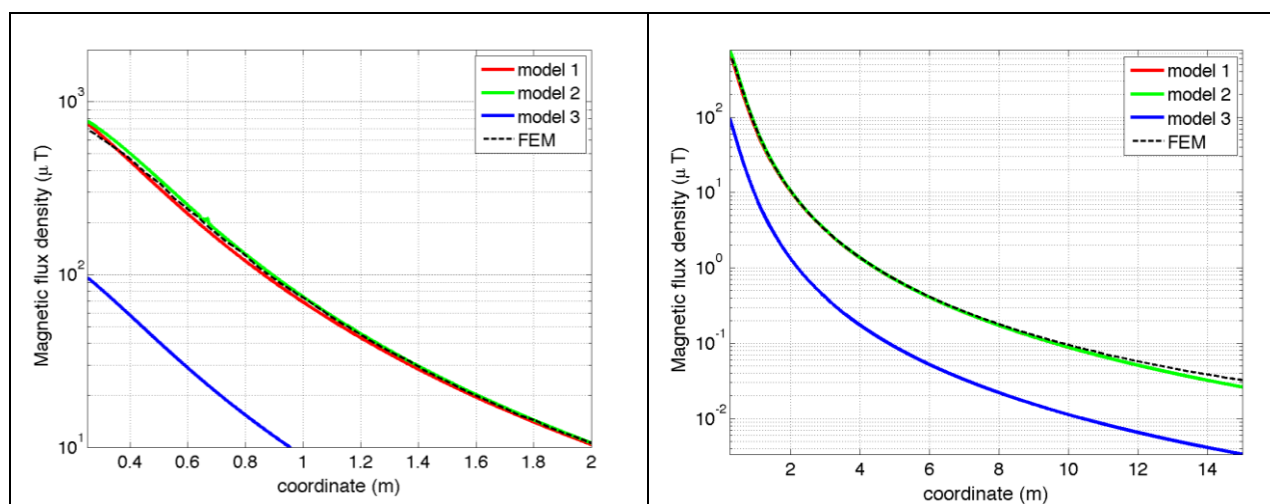


Fig. 12. Induzione magnetica lungo la linea laterale

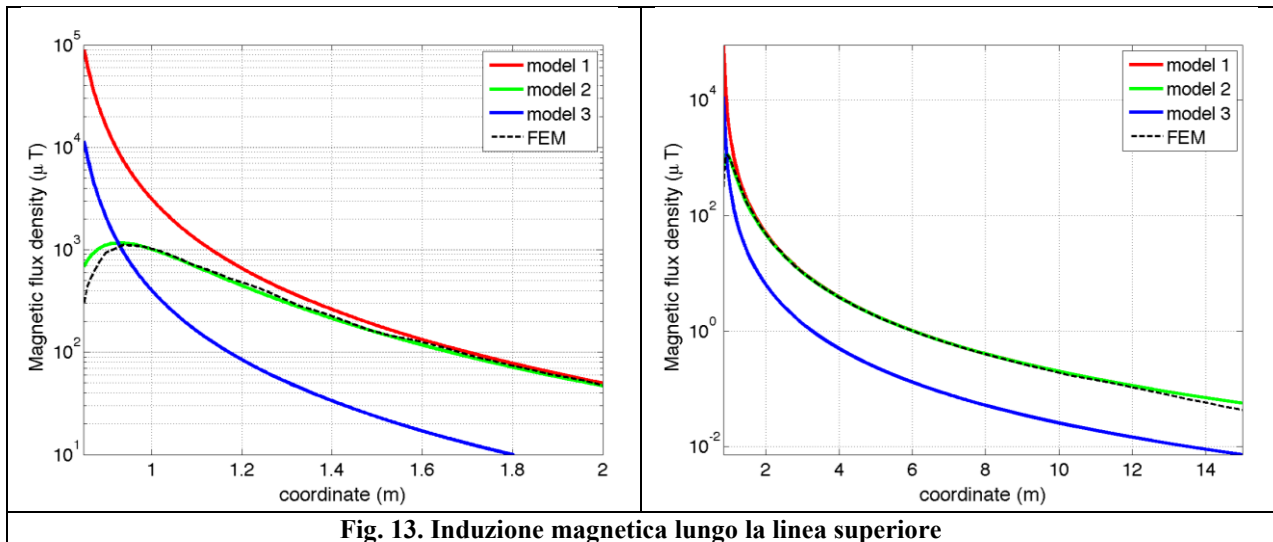


Fig. 13. Induzione magnetica lungo la linea superiore

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 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.

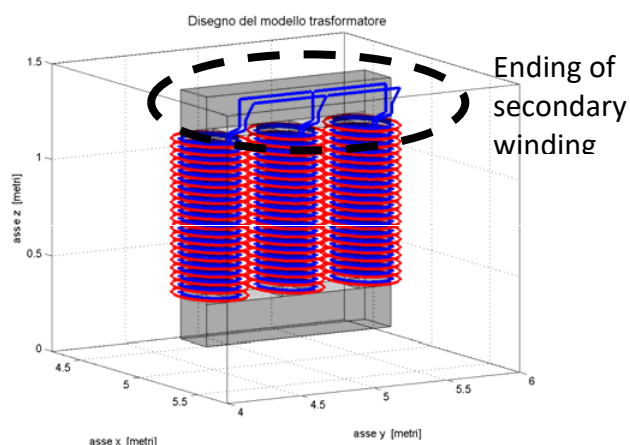


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate al lati BT.

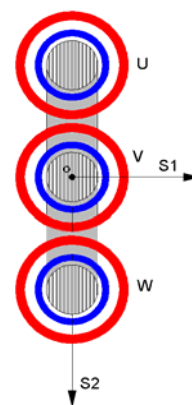


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

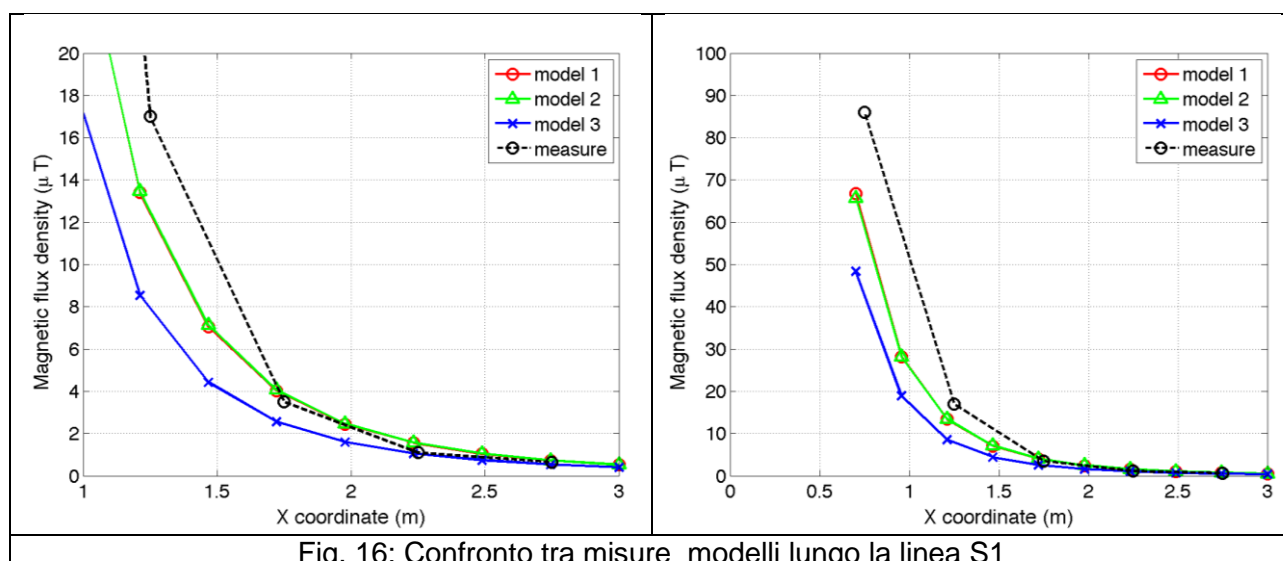


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

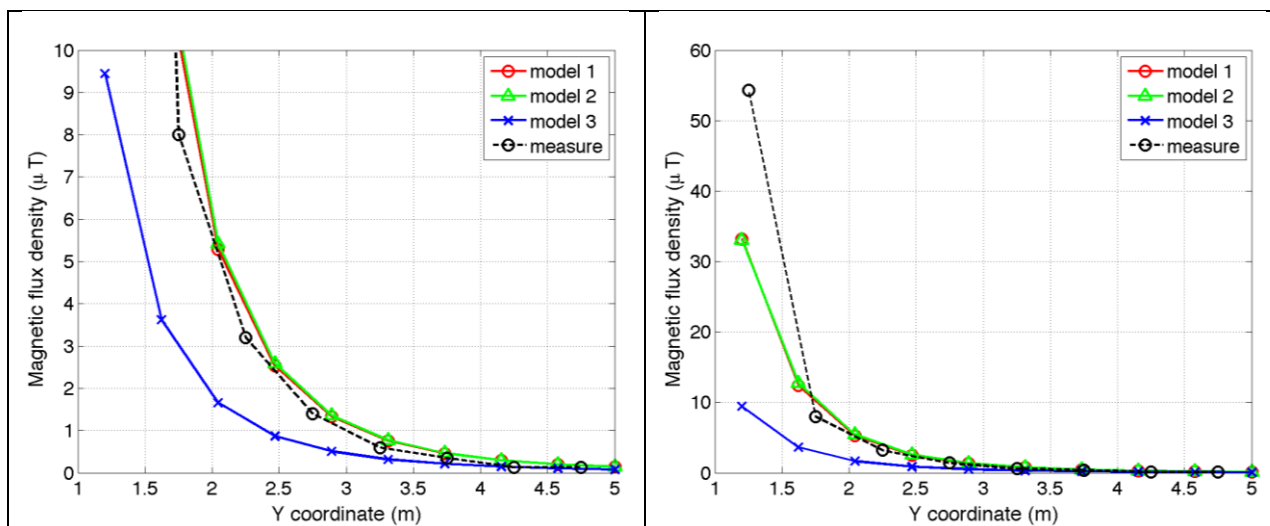


Fig. 17. Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

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.