

CLIENTE - CUSTOMER:	ITA CERAMICHE	COMM. CEFLA - CEFLA PROJ. No.
LOCALITA' - PLANT LOCATION:	Fiorano Modenese (MO)	160522
IMPIANTO - PLANT:	COGENERAZIONE DA GAS	N. DOC. - DOC. No
UNITÀ EMITTENTE - ISSUING DPT:	UTE	E-CL-027

VALUTAZIONE DI IMPATTO Elettromagnetico RELAZIONE DI CALCOLO D.P.A.



3						
2						
1						
0	25/11/2022	FIRST ISSUE	F. Fiorini	D. Sarro	M. Barnabè	PAGINA SHEET
REV.	DATA DATE	DESCRIZIONE DESCRIPTION	REDATTO PREP'D	CONTROLLATO CHECK'D	APPROVATO APPR'D	DI OF
						1 10

Il presente documento è di proprietà della **CEFLA srl**. A termini di legge ogni diritto è riservato.
This document is the property of **CEFLA srl**. All rights are reserved according to law.

INDICE

1	PREMESSE.....	3
1.1	OGGETTO	3
1.2	RIFERIMENTI NORMATIVI	3
1.3	DEFINIZIONI	4
1.3.1	OBIETTIVO DI QUALITA'	4
1.3.2	FASCIA DI RISPETTO	4
1.3.3	DISTANZA DI PRIMA APPROSSIMAZIONE (DPA).....	4
2	CALCOLO DPA	5
2.1	CALCOLO 1: ISOLA COGENERATIVA.....	6
2.2	CALCOLO 2: LINEA 15 KV INTERRATA A STABILIMENTO	9
3	CONCLUSIONI	10
3.1	ALLEGATI	10

0	FIRST ISSUE	21/11/2022	N. DOC. / DOC. No	PAGINA SHEET	DI OF
REV.	DESCRIZIONE DESCRIPTION	DATA DATE	E-CL-027	2	10

1 PREMESSE

1.1 OGGETTO

La presente relazione di calcolo delle distanze di prima approssimazione (DPA) e delle rispettive fasce di rispetto per la nuova centrale di cogenerazione all'interno dello stabilimento ITA CERAMICHE di Fiorano Modenese, costituita da un motore endotermico in grado di produrre una potenza elettrica di 4,300 MWe, si basa sulla adozione del software Nofield MAGIC di cui in allegato il documento di validazione.

Si precisa, inoltre, che secondo quanto previsto dal Decreto 29 maggio 2008 art.3.2, la tutela in merito alle fasce di rispetto di cui all'art. 6 del DPCM 8 luglio 2003 non si applica ai seguenti casi:

- linee esercite a frequenza diversa da quella di rete di 50 Hz (ad esempio linee di alimentazione dei mezzi di trasporto);
- linee di classe zero ai sensi del DM 21 marzo 1988, n. 449 (ad esempio linee di telecomunicazione);
- linee di prima classe ai sensi del DM 21 marzo 1988, n. 449 (linee in bassa tensione);
- linee di Media Tensione in cavo cordato ad elica (linee interrate ENEL);
- in quanto le relative fasce di rispetto hanno un'ampiezza ridotta, inferiore alle distanze previste dal DM 21 marzo 1988, n. 449 e s.m.i..

1.2 RIFERIMENTI NORMATIVI

Legge 22 febbraio 2001, n. 36	Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici
D.P.C.M. 8 luglio 2003	Fissazione dei limiti di esposizione, valori di attenzione ed obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti
D.M. 21 marzo 1988, n. 449	Approvazione delle norme tecniche per la progettazione, l'esecuzione e l'esercizio delle linee aeree esterne" e s.m.i.";
D.M. 29 maggio 2008	Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti (pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n° 156 del 05 luglio 2008 suppl. ordinario n°160);
CEI 11-17	Impianti di produzione, trasmissione, distribuzione pubblica di energia elettrica - Linee in cavo;

0	FIRST ISSUE	21/11/2022	N. DOC. / DOC. No	PAGINA SHEET	DI OF
REV.	DESCRIZIONE DESCRIPTION	DATA DATE	E-CL-027	3	10

CEI 106-11	Guida per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti secondo le disposizioni del DPCM 8 luglio 2003 (Art. 6). Parte I;
CEI 106-12	Guida pratica ai metodi e criteri di riduzione dei campi magnetici prodotti dalle cabine elettriche MT/BT;
CEI 211-4	Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati dalle linee e da stazioni elettriche.

1.3 DEFINIZIONI

1.3.1 OBIETTIVO DI QUALITA'

D.P.C.M. 8 luglio 2003 art. 4: nella progettazione di nuovi elettrodotti in corrispondenza di aree gioco per l'infanzia, di ambienti abitativi, di ambienti scolastici e di luoghi adibiti a permanenze giornaliere non inferiori a quattro ore e nella progettazione dei nuovi insediamenti e delle nuove aree di cui sopra in prossimità di linee ed installazioni elettriche già presenti nel territorio, ai fini della progressiva minimizzazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettrici e magnetici generati dagli elettrodotti operanti alla frequenza di 50 Hz, e fissato l'obiettivo di qualità di 3 μ T per il valore dell'induzione magnetica, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore.

1.3.2 FASCIA DI RISPETTO

E' 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 (3 μ T). Come prescritto dall'articolo 4, c. 1 lettera h) della Legge Quadro n. 36 del 22 febbraio 2001, all'interno delle fasce di rispetto non è consentita alcuna destinazione di edifici ad uso residenziale, scolastico, sanitario e ad uso che comporti una permanenza non inferiore a quattro ore.

1.3.3 DISTANZA DI PRIMA APPROSSIMAZIONE (DPA)

Per le linee di distribuzione e le cabine secondarie è la distanza, in pianta sul livello del suolo, da tutte le pareti della cabina stessa che garantisce i requisiti richiesti.

0	FIRST ISSUE	21/11/2022	N. DOC. / DOC. No	PAGINA SHEET	DI OF
REV.	DESCRIZIONE DESCRIPTION	DATA DATE	E-CL-027	4	10

2 CALCOLO DPA

Sono stati effettuati i seguenti calcoli:

- Calcolo 1: Isola Cogenerativa;
- Calcolo 2: Linea elettrica interrata 15kV a stabilimento;

La configurazione ipotizzata prevede:

- per la rete 6,3/15 kV in isola cogenerativa: la potenza nominale del generatore (5.338 kVA) al massimo fattore di potenza capacitivo ($\cos\varphi_R = 0,80$), non considerando le perdite di trasformazione e trasporto;
- per la rete 15/0,4 kV in isola cogenerativa: la potenza nominale del trasformatore ausiliari (315 kVA), senza considerare gli effettivi consumi ausiliari.
- per la linea 15 kV a stabilimento: la potenza nominale del generatore (5.338 kVA) al massimo fattore di potenza capacitivo ($\cos\varphi_R = 0,80$), non considerando i consumi ausiliari di centrale e le perdite di trasformazione e trasporto;

Pertanto tale ipotesi di calcolo è da considerarsi oltremodo cautelativa.

0	FIRST ISSUE	21/11/2022	N. DOC. / DOC. No	PAGINA SHEET	DI OF
REV.	DESCRIZIONE DESCRIPTION	DATA DATE	E-CL-027	5	10

2.1 CALCOLO 1: ISOLA COGENERATIVA

Le dimensioni dei locali sono riportate nella pianta allegata.

A seguito vengono riassunti i dati in ingresso utilizzati per il calcolo e necessari per la verifica dei risultati ottenuti:

Tab. 2.1.1 Caratteristiche rete 6,3/15 kV:

DESCRIZIONE	TENSIONE (kV)	POTENZA NOMINALE (kVA)	CORRENTE NOMINALE (A)
Generatore "GS"	6,3	5.338	489
Linea 1 da "GS" a "QMT-GEN1" RG16H1R12 12/20 kV – 3(1x300) mm ²	6,3	-	489
Quadro Media Tensione 6,3 kV "QMT-C2"	6,3	-	630,00
Linea 2 da "QMT-GEN1" a "TR-G1" RG16H1R12 12/20 kV – 3(1x300) mm ²	6,3	-	489
Trasformatore elevatore "TR-G1"	6,3 15	5.500	504 212
Linea 3 da "TR-G1" a "QMT-COGE" RG16H1R12 12/20 kV – 3(1x95) mm ²	15	-	205
Quadro Media Tensione 15 kV "QMT-COGE"	15	-	630,00

Tab. 2.1.2 Caratteristiche rete 0,4/15 kV:

DESCRIZIONE	TENSIONE (kV)	POTENZA NOMINALE (kVA)	CORRENTE NOMINALE (A)
Quadro Media Tensione 15 kV "QMT-COGE"	15	-	630,00
Linea 4 da "QMT-COGE" a "TR-AUX" RG16H1R12 12/20 kV – 3(1x35) mm ²	15	-	12
Trasformatore ausiliari "TR-AUX"	15 0,4	315	12 455
Linea 5 - da "TR-AUX" a "QBT" FG16R16 0,6/1 kV – 3(1x185)+N(1x95) mm ²	0,4	-	455
Quadro Bassa Tensione 400 V "QBT"	0,4	-	630

0	FIRST ISSUE	21/11/2022	N. DOC. / DOC. No	PAGINA SHEET	DI OF
REV.	DESCRIZIONE DESCRIPTION	DATA DATE	E-CL-027	6	10

Fig. 2.1.1 Vista assonometrica lay out cabina – RETE 6,3/15 kV

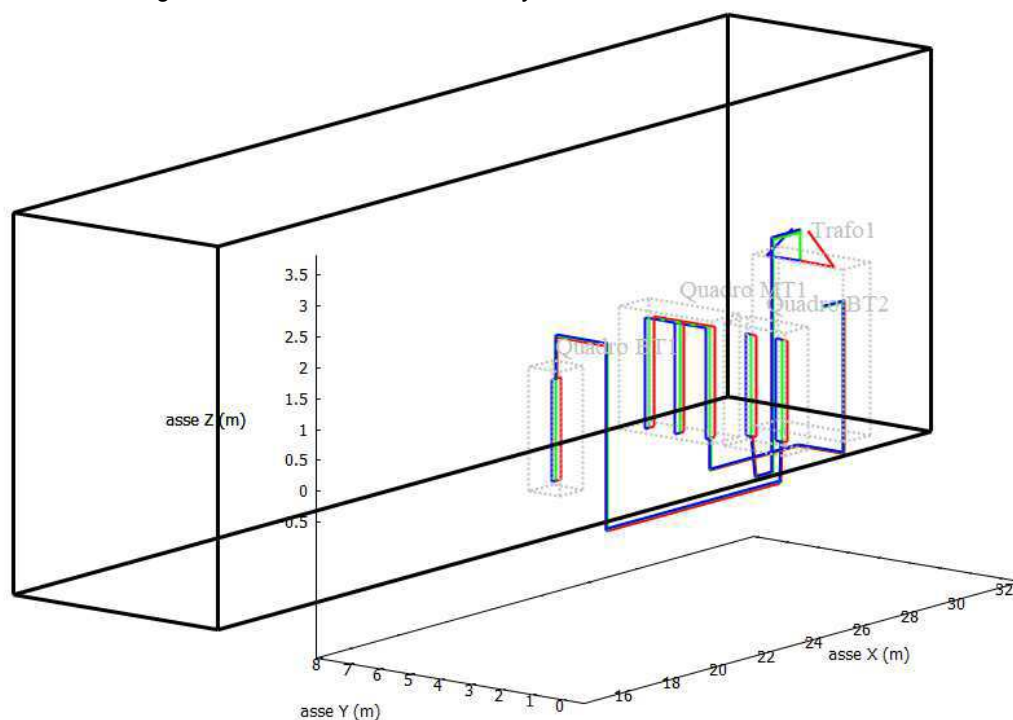
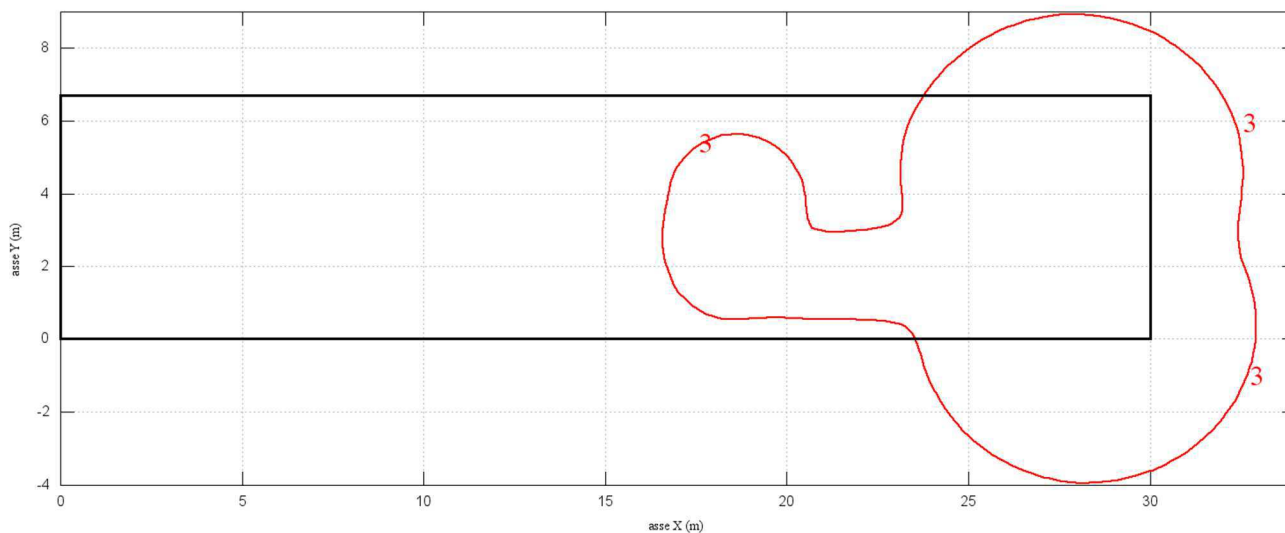


Fig. 2.1.2 Curve isolivello a quota 0,00m – RETE 6,3/15 kV
Cabina - calcolo su piano xy - quote Z=0 m



0	FIRST ISSUE	21/11/2022	N. DOC. / DOC. No	PAGINA SHEET	DI OF
REV.	DESCRIZIONE DESCRIPTION	DATA DATE	E-CL-027	7	10

Fig. 2.1.3 Vista assonometrica lay out cabina – RETE 0,4/15kV

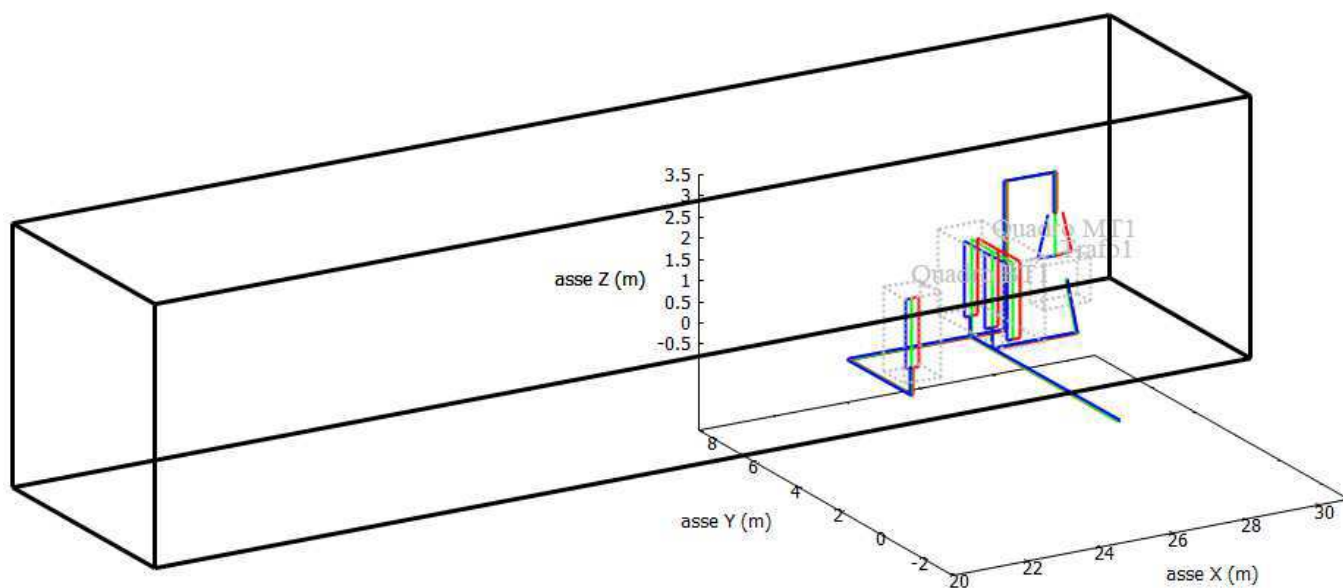
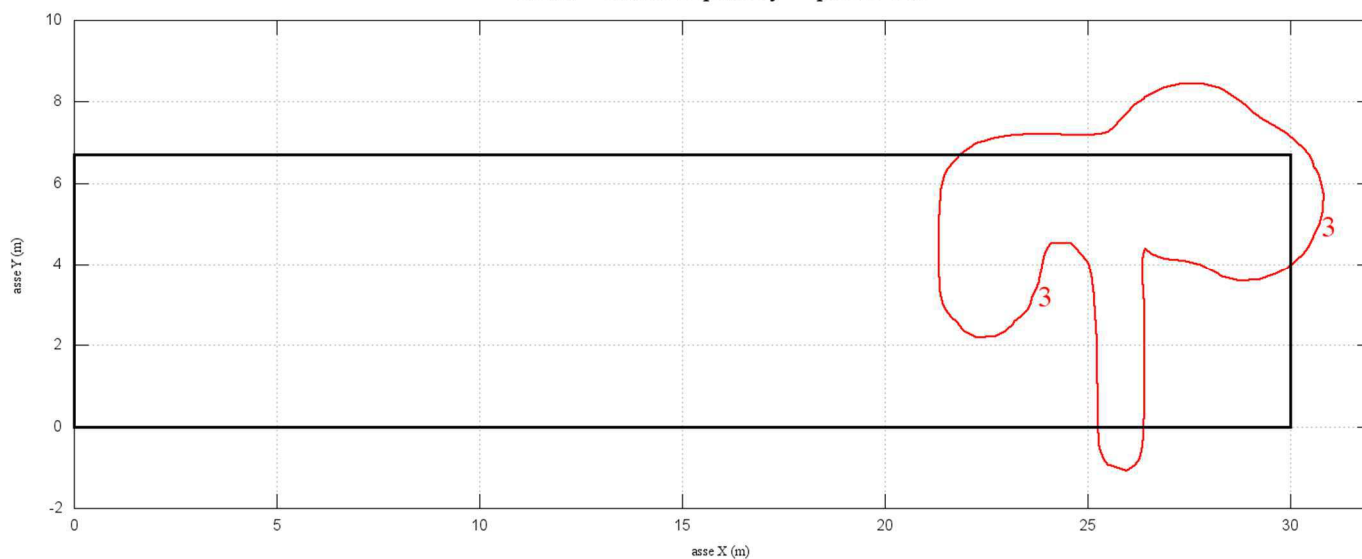


Fig. 2.1.2 Curve isolivello a quota 0,00m – RETE 0,4/15kV

Cabina - calcolo su piano xy - quote Z=0 m



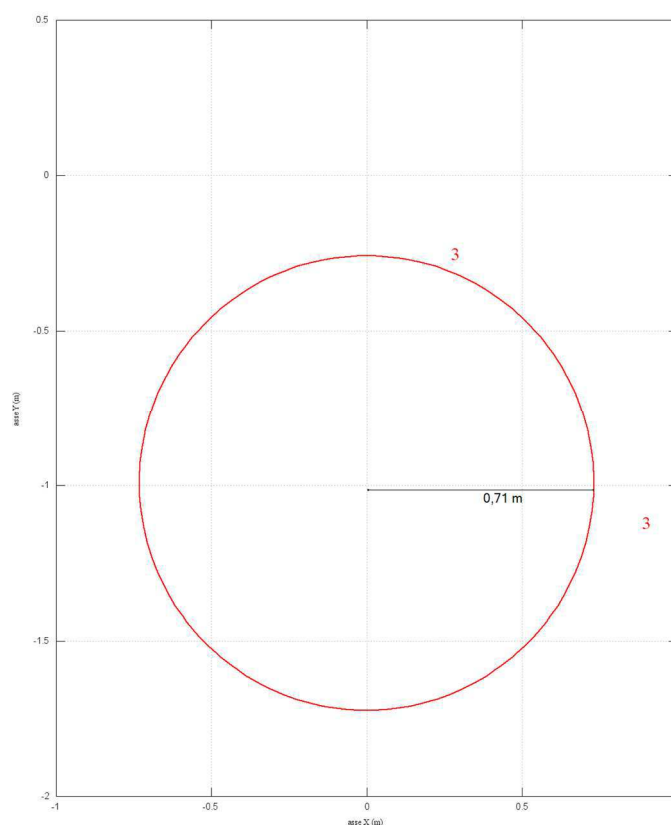
0	FIRST ISSUE	21/11/2022	N. DOC. / DOC. No	PAGINA SHEET	DI OF
REV.	DESCRIZIONE DESCRIPTION	DATA DATE	E-CL-027	8	10

2.2 CALCOLO 2: LINEA 15 KV INTERRATA A STABILIMENTO

A seguito vengono riassunti i dati in ingresso utilizzati per il calcolo e necessari per la verifica dei risultati ottenuti:

–	Posa	INTERRATA	
–	Altezza di posa	-1,0	m
–	Lunghezza complessiva	(circa) 120	m
–	Disposizione conduttori	trifoglio	
–	Distanza tra i conduttori	0,032	m
–	Corrente nominale	205	A
–	Tensione nominale	15	kV
–	Formazione	RG16H1R12 12/20 kV – 3(1x95)	mm ²

Fig. 2.2.1 Vista in sezione curve isolivello



0	FIRST ISSUE	21/11/2022	N. DOC. / DOC. No	PAGINA SHEET	DI OF
REV.	DESCRIZIONE DESCRIPTION	DATA DATE	E-CL-027	9	10

3 CONCLUSIONI

L'obiettivo di qualità (intensità del campo magnetico $< 3 \mu\text{T}$) relativamente alle cabine di trasformazione e linee di distribuzione in MT sono riportate nei presenti grafici e planimetria allegata. Entro queste distanze non devono essere previste lavorazioni che comportino la permanenza di addetti superiore a 4 ore/giorno.

Al fine di ridurre ulteriormente il valore di induzione magnetica è possibile attuare i seguenti accorgimenti:

- utilizzare canalizzazioni metalliche chiuse con coperchio;
- transitare con le canalizzazioni il più possibile verso il centro della cabina elettrica;
- non addossare i trasformatori ed i quadri elettrici alle pareti esterne della cabina ove e presumibile possano identificarsi situazioni critiche;
- ove possibile posare i cavi ad elica.

Non è previsto l'impiego di cavi in media tensione cordati ad elica visibile, in quanto l'obiettivo di qualità è ottenuto alle condizioni di posa considerate nel calcolo.

3.1 ALLEGATI

- Documento di validazione software Nofield MAGIC
- Planimetrie Distanze di Prima Approssimazione

0	FIRST ISSUE	21/11/2022	N. DOC. / DOC. No	PAGINA SHEET	DI OF
REV.	DESCRIZIONE DESCRIPTION	DATA DATE	E-CL-027	10	10



BESHIELDING

Documento di Validazione

Algoritmi di calcolo del software MAGIC® (**MAG**netic Induction **C**alculation)

Revisione	Data	Elaborato	Approvato
06	29/06/2021	F.M.M.	S.G.
00 Emissione	07/01/2014	D.B.	M.M.

Sommario

1. Premessa	1
2. Verifica del modulo bidimensionale.....	2
2.1. Confronto con CEI 211-04	2
2.2. Confronto con codice CESI.....	2
3. Verifica del modulo tridimensionale	6
3.1. Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato	6
3.2. Validazione sperimentale del modulo tridimensionale	7
4. Verifica del modulo tridimensionale:trasformatore di potenza	8
4.1. Verifica del modello MAGIC® della singola colonna del trasformatore con modello FEM (Finite Element Method).....	8
4.2. Verifica del modello MAGIC® del trasformatore completo con misure sperimentali.....	10
5. Conclusioni	12



1. 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).



2. 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.

2.1. 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 le norme 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 B è data dall'espressione:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{k=1}^N \frac{\vec{I}_k}{d_k} \vec{u}_l \times \vec{u}_r$$

in cui N è il numero dei conduttori, d è la distanza tra il conduttore k -esimo e il punto di calcolo; i vettori \vec{u}_l e \vec{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.

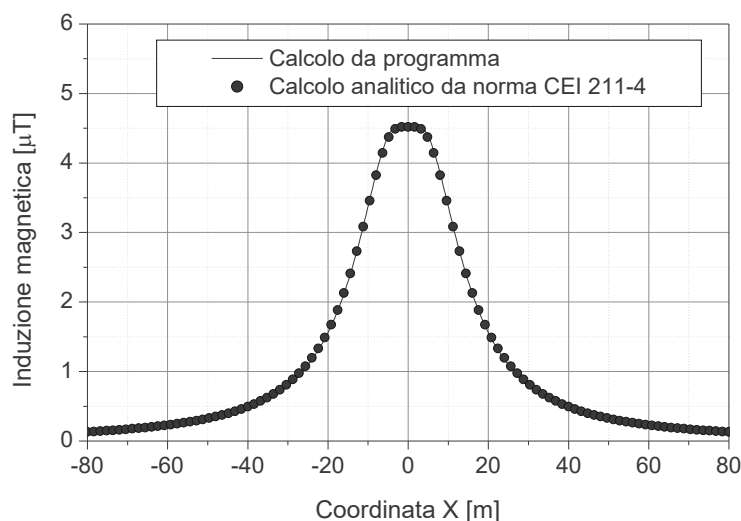


Figure 1 Induzione magnetica al suolo in prossimità di una linea aerea a doppia terna su semplice palificazione con corrente di 310: confronto tra MAGIC® e formula analitica CEI 211-4

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.

2.2. 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 interrimento pari a 1.25 m)
- Formazione piana (interasse 35 cm e livello di interrimento pari a 1.25 m)
- Distanza tra le due terne: 4m

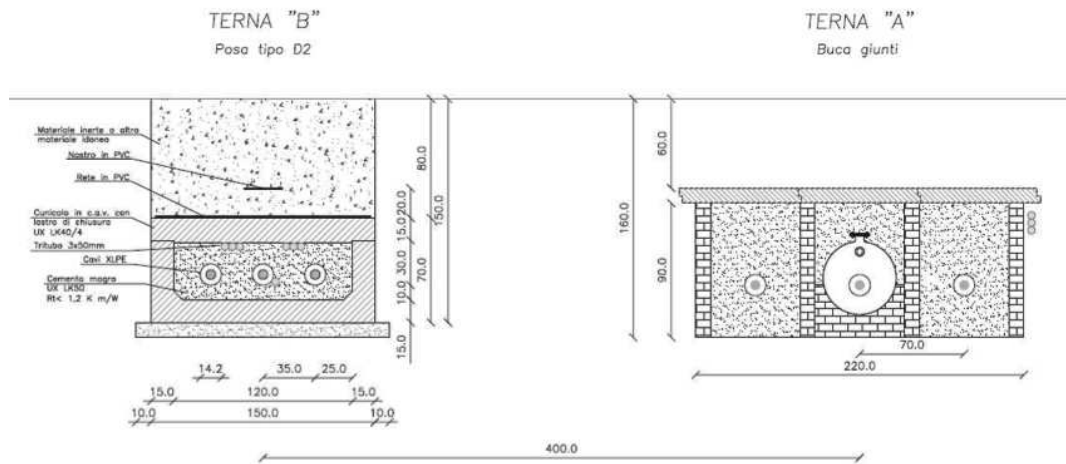


Figure 2 Affiancamento tra due linee interrate AT

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.

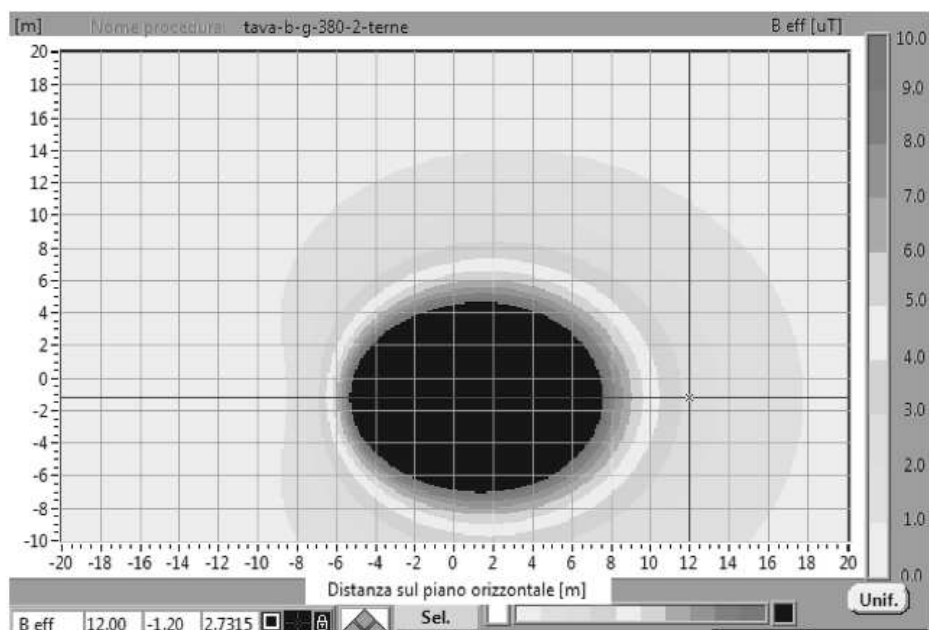


Figure 3 Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.

multiconduttori arbitrari (modello 2D)

Numero segmenti OK ☒ Corrente in modulo e fase ☐ Corrente in parte reale e immaginaria

Conduttore	X (m)	Y (m)	Modulo (A)	Fase (gradi)
Conduttore 1	-0.35	-1.25	1500	0
Conduttore 2	0	-1.25	1500	-120
Conduttore 3	0.35	-1.25	1500	120
Conduttore 4	3.3	-1.25	1500	120
Conduttore 5	4	-1.25	1500	-120
Conduttore 6	4.7	-1.25	1500	0

Induzione magnetica su un punto Induzione magnetica su una linea Induzione magnetica su un piano

Punto 1: x1 y1 Punto 2: x2 y2 Discretizzazione: Num. punti x Num. punti y

Ozioni di visualizzazione: Mappa 2D Salva Mappa 3D Salva Curva isolivello μT Livello_singolo Salva OK

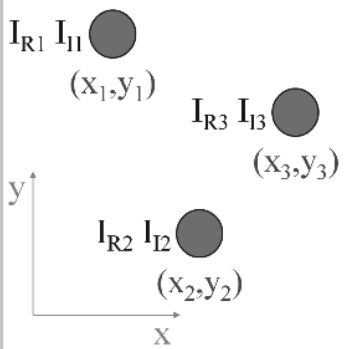


Figure 4 Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)”: dati definizione geometria e sorgenti

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

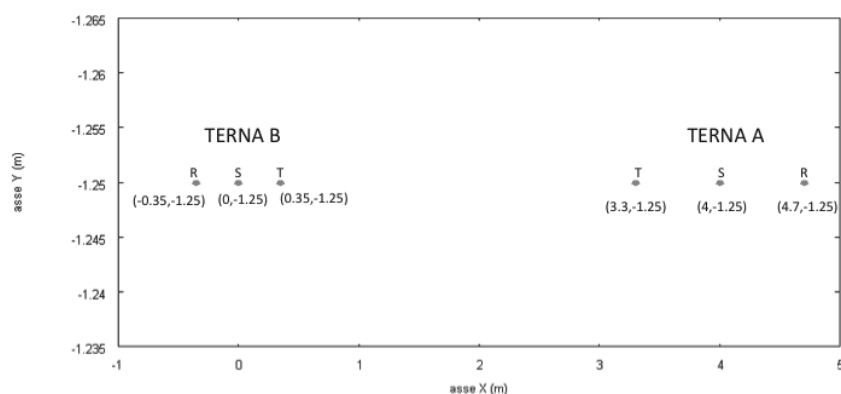


Figure 5 Geometria sorgenti

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

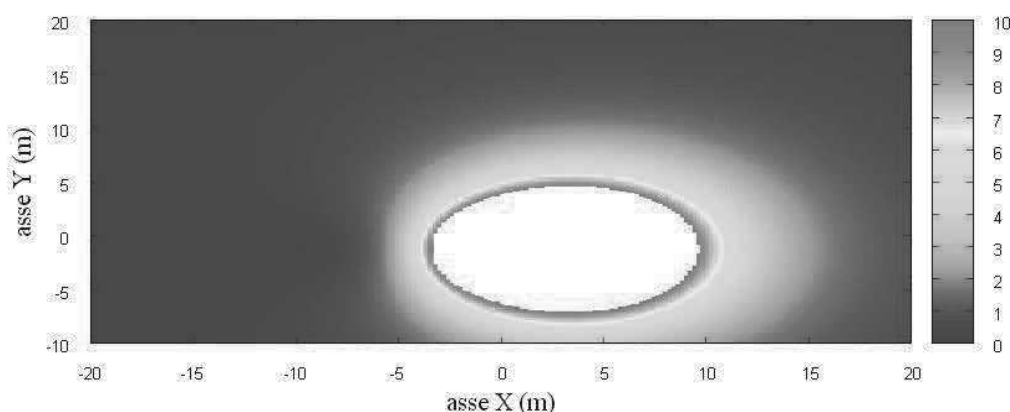


Figure 6 Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):



BESHIELDING

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

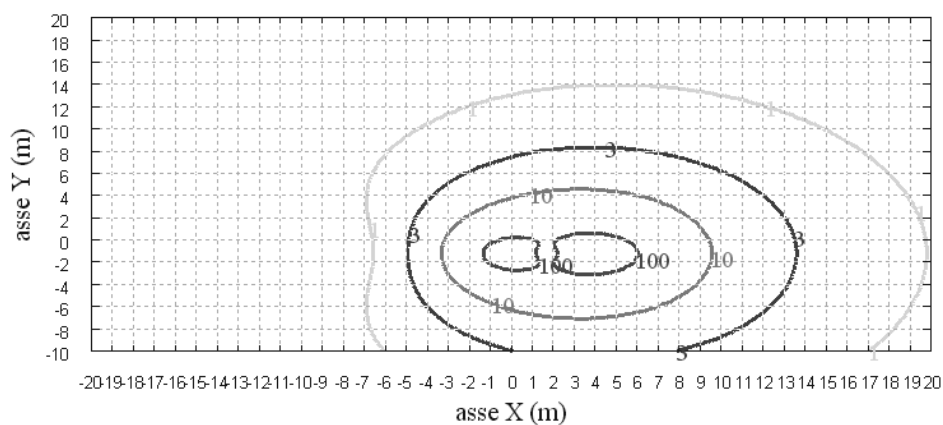


Figure 7 Linee isolivello dell'induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®

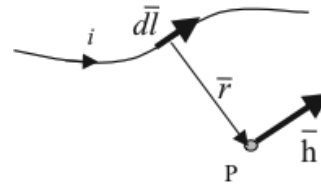
Come si può osservare le mappe cromatiche dei due modelli risultano essere in perfetto accordo.



3. Verifica del modulo tridimensionale

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

$$\vec{h} = \int \frac{i d\vec{l} \wedge \vec{r}}{4\pi r^2}$$



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.

3.1. Campo prodotto da un segmento finito arbitrariamente orientato

Si consideri il segmento rappresentato nella Fig. 8.

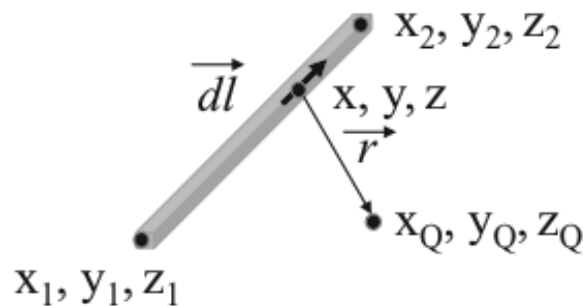


Figure 8 Modello del segmento.

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



3.2. 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.

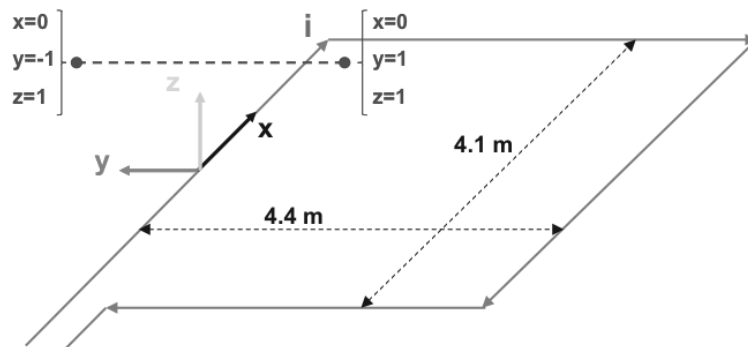


Figure 9 Schema di spira quadrata.

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

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

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

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

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

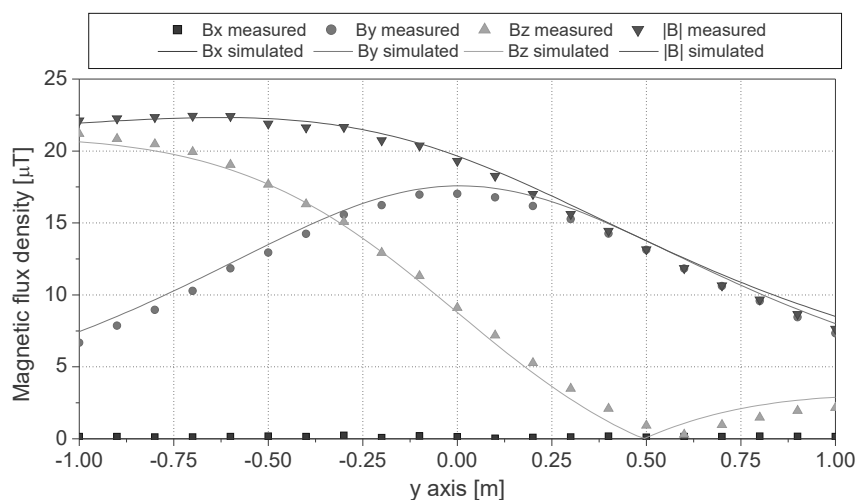


Figure 10 Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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



4. 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.

4.1. 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 ($N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$) e verranno considerate, come sorgenti, le correnti nominali.

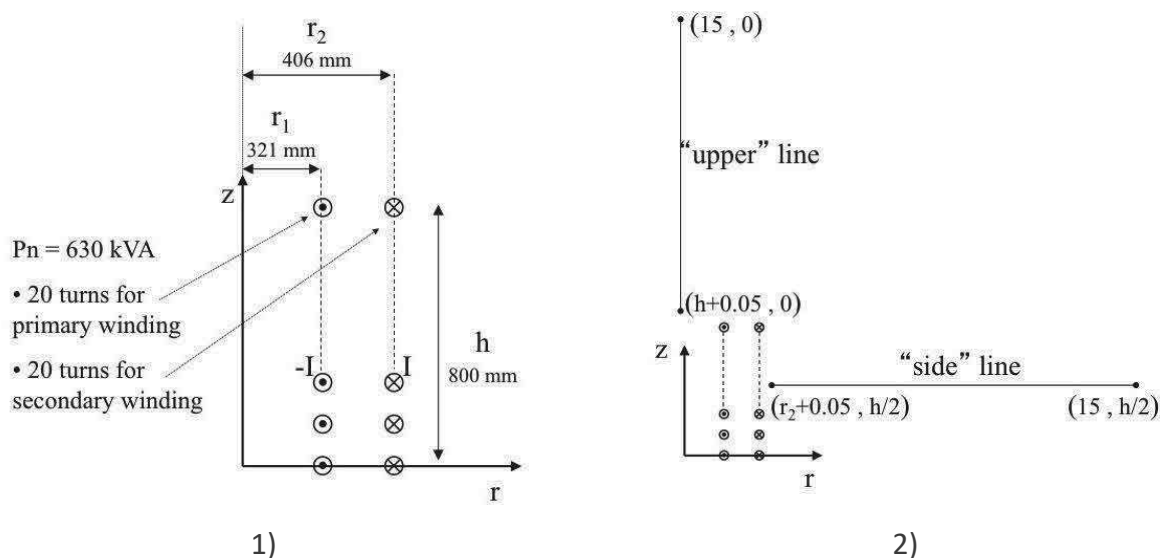


Figure 11 Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

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:

$$I = I_R \cdot \frac{V_{SC} \%}{100}$$

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).

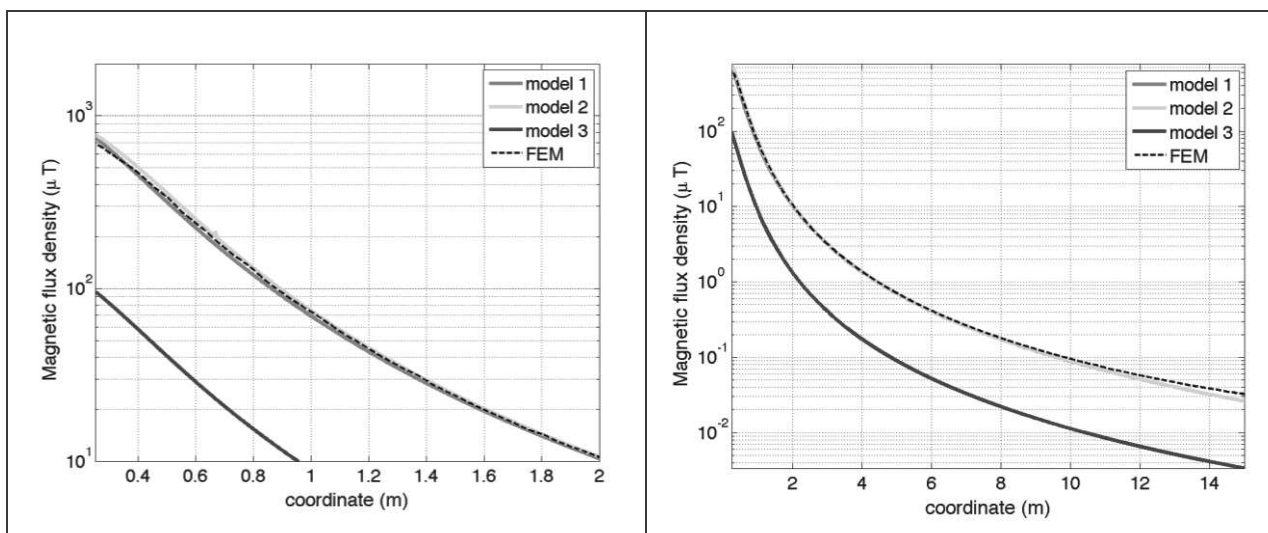


Figure 12 Induzione magnetica lungo la linea laterale

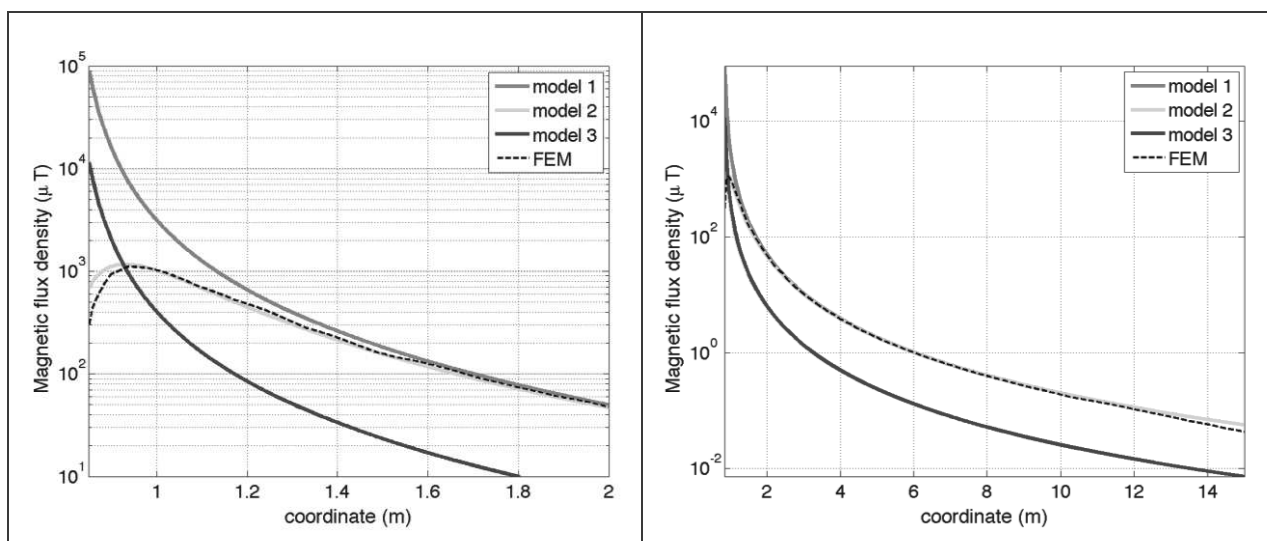


Figure 13 Induzione magnetica lungo la linea superiore



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.

4.2. 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 sul campo magnetico ambientale, specialmente nella direzione S1. Pertanto, l'introduzione di tali sorgenti addizionali 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.

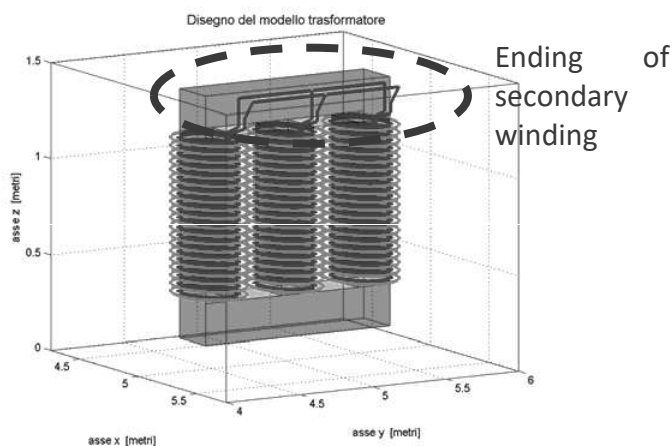


Figure 14 Connessioni elettriche considerate ai lati BT.

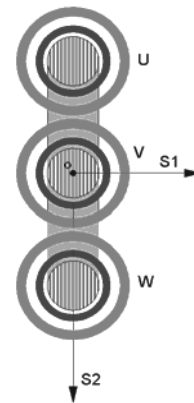


Figure 15 Linee di calcolo S1 ed S2

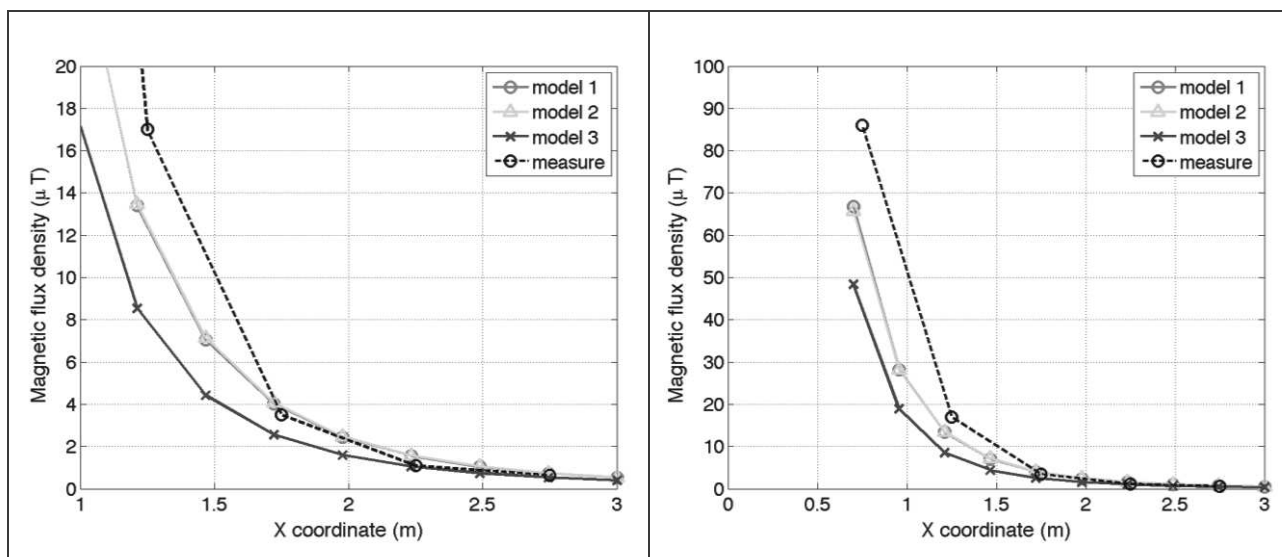


Figure 16 Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

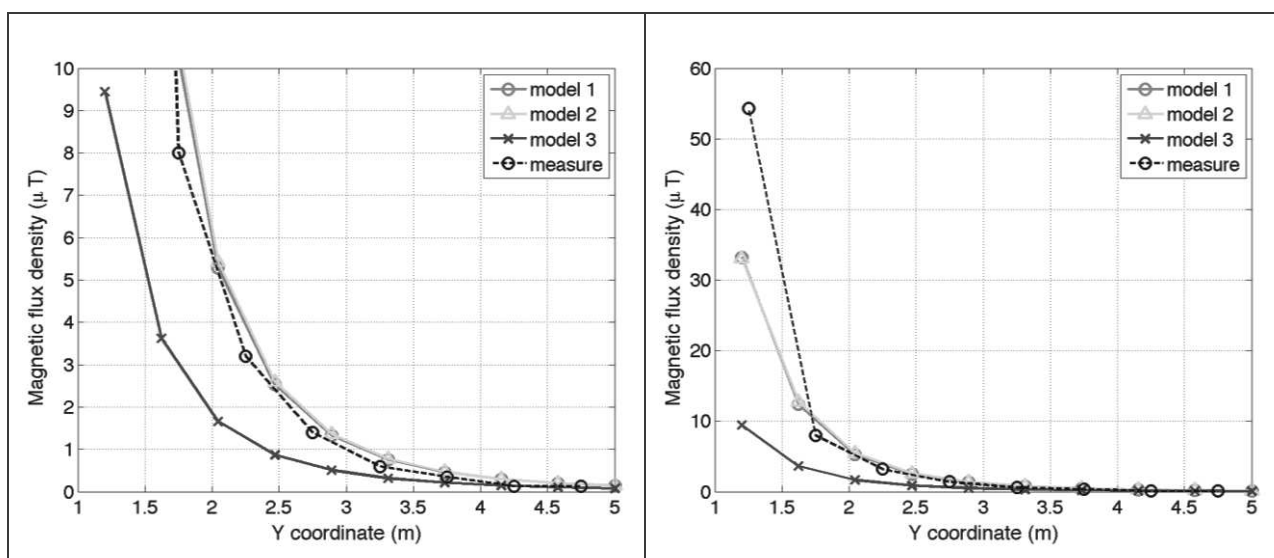


Figure 17 Confronto tra misure modelli lungo la linea S2



5. 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:

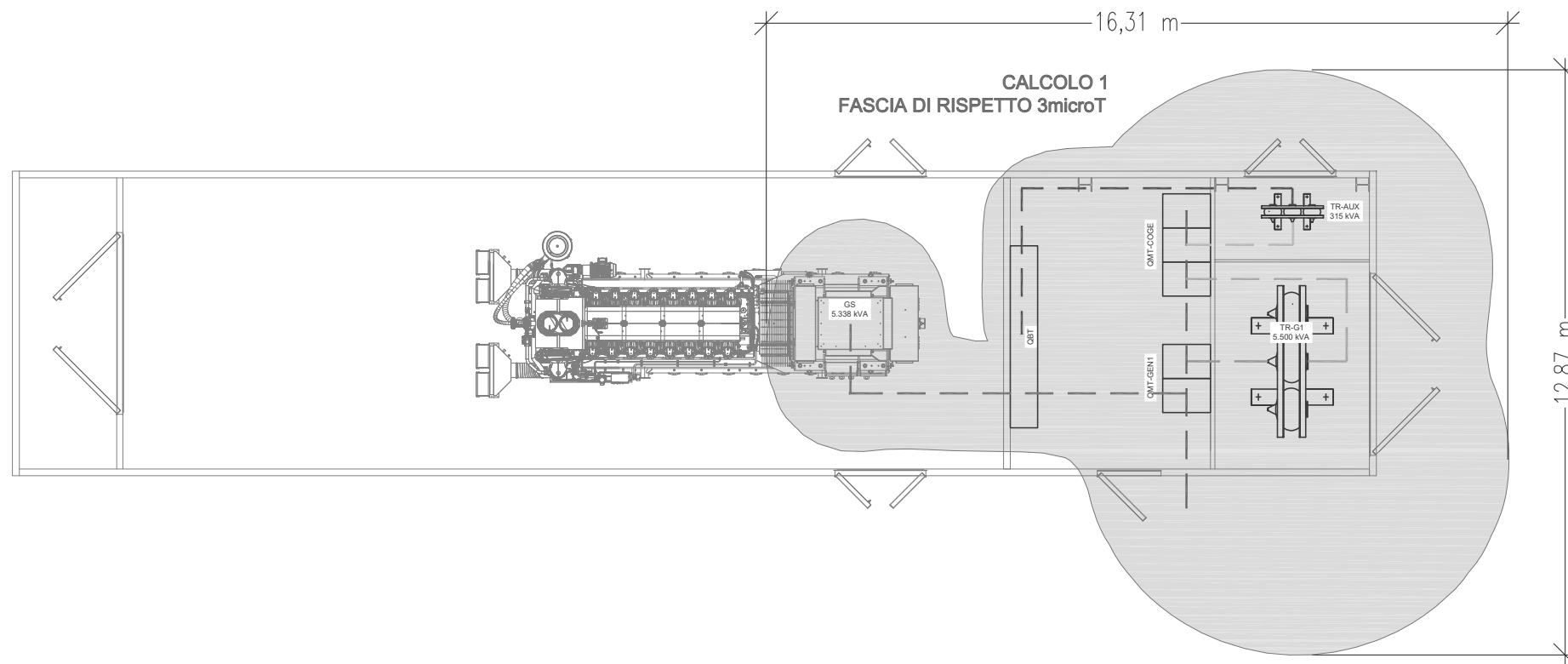
“...i modelli utilizzati devono essere descritti in termini di algoritmi implementati, condizioni al contorno e approssimazioni attuate. Essi devono essere validati attraverso misure o per confronto con modelli che abbiano subito analogo processo di verifica. La documentazione esplicativa e comprovante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

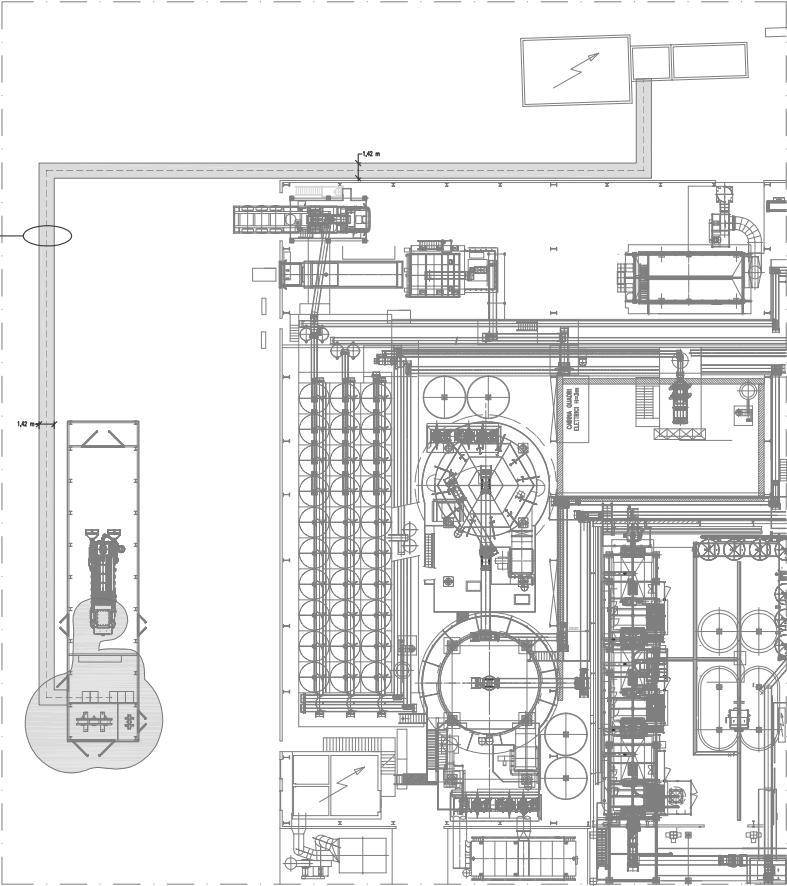
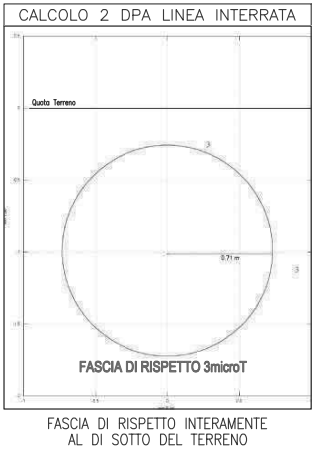
PIANTA DISTANZE PRIMA APPROSSIMAZIONE QUOTA +0,00
ISOLA COGENERATIVA
scala 1:100



LEGENDA LINEE ELETTRICHE:

- 1 - da GS a QMT-GEN1: RG16H1R12 3(1x300) - Vn=6,3 kV In=489 A
- 2 - da QMT-GEN1 a TR-G1: RG16H1R12 3(1x300) - Vn=6,3 kV In=489 A
- 3 - da TR-G1 a QMT-COGE: RG16H1R12 3(1x95) - Vn=15 kV In=205 A
- 4 - da QMT-COGE a TR-AUX: RG16H1R12 3(1x35) - Vn=15 kV In=12 A
- 5 - da TR-AUX a QBT: FG16R16 3(1x185) + N(1x95) - Vn=0,4 kV In=455 A
- 6 - da QMT-COGE a STABILIMENTO: RG16H1R12 3(1x120) - Vn=15 kV In=205 A

PIANTA DISTANZE PRIMA APPROSSIMAZIONE QUOTA +0,00
LINEA A CABINA STABILIMENTO
scala 1:500



- LEGENDA LINEE ELETTRICHE:
- 1 - da GS a QMT-GEN1: RG16H1R12 3(1x300) - Vn=6,3 kV In=489 A
 - 2 - da QMT-GEN1 a TR-G1: RG16H1R12 3(1x300) - Vn=6,3 kV In=489 A
 - 3 - da TR-G1 a QMT-COGE: RG16H1R12 3(1x95) - Vn=15 kV In=205 A
 - 4 - da QMT-COGE a TR-AUX: RG16H1R12 3(1x35) - Vn=15 kV In=12 A
 - 5 - da TR-AUX a QBT: FG16R16 3(1x185) + N(1x95) - Vn=0,4 kV In=455 A
 - 6 - da QMT-COGE a STABILIMENTO: RG16H1R12 3(1x120) - Vn=15 kV In=205 A