

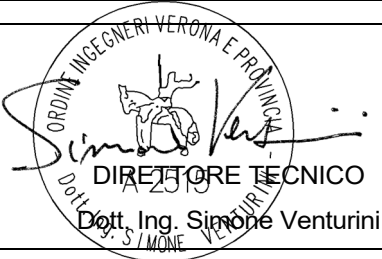


PROGETTO DEFINITIVO DELL'IMPIANTO AGRIVOLTAICO DELLA POTENZA DI PICCO DI 360MW CON SISTEMA DI ACCUMULO DI CAPACITA' PARI A 82,5MWH E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RETE RTN, DA REALIZZARSI NEL COMUNE DI SASSARI NELLE FRAZIONI DI "PALMADULA, LA CORTE, CANAGLIA, LI PIANI, SAN GIORGIO, SCALA ERRE"

PROGETTO DEFINITIVO

COMMITTENTE: **PALMADULA
SOLAR S.R.L.**

PROGETTISTA:



TITOLO ELABORATO:

RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI

ELABORATO n°:
BI028F-D-PAL-RT-21-r00

NOME FILE:

SCALA: ----

DATA: AGOSTO 2023

REVISIONE	N.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
	00	Agosto 2023	Prima Emissione	E. Guiot	M. Sandri	S. Venturini
	01					
	02					
	03					
	04					

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 1
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	

SOMMARIO

1. PREMESSA	4
2. DESCRIZIONE TECNICA DELL'IMPIANTO.....	5
2.1. Sottostazione AT/MT.....	7
2.2. Suddivisione delle zone e rete primaria MT	9
2.3. Campo fotovoltaico	10
3. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	12
4. DEFINIZIONI	15
5. VALUTAZIONE DEI CAMPI ELETTRICI PER LE INSTALLAZIONI ELETTRICHE.....	20
5.1. Metodologia di calcolo	20
5.2. Campo fotovoltaico – Circuiti in c.c.....	22
5.3. Circuiti in c.a. alla tensione di 800V.....	22
5.4. Cavi MT alla tensione di 30kV per distribuzione secondaria	23
5.5. Cavi MT alla tensione di 30kV per distribuzione principale.....	25
5.6. Cabina MT/BT (stazione di energia)	27
5.7. Cabina di testa.....	31
5.8. Linea in cavo 380kV da punto di connessione Olmedo a SSTS	34
5.9. Linea in cavo 150kV da SSTS a SSTN	38
5.10. Sottostazione sud	40
5.11. Sottostazione nord	48
6. CONCLUSIONI	53
7. ALLEGATO A: DESCRIZIONE ALGORITMO DI CALCOLO.....	55
8. ALLEGATO B: DOCUMENTO DI VALIDAZIONE DEL SOFTWARE.....	79

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BIO28F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 2
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1: Planimetria generale di progetto	5
Figura 5.1: Linee isoinduzione magnetica 3, 10, 100 uT per linee BT 800V	23
Figura 5.2: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno per linea 800Vca	23
Figura 5.3: curve isoinduzione 3,10,100uT per linee 30kV di distribuzione secondaria	24
Figura 5.4: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno per linea 30kV secondaria	24
Figura 5.5: curve isoinduzione 3,10,100uT per linee 30kV di distribuzione primaria	26
Figura 5.6: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno per linea 30kV primaria	26
Figura 5.7: modello geometrico per stazione di energia	28
Figura 5.8: modello geometrico stazione energia - Vista dall'alto	28
Figura 5.9: curve isolivello del valore di induzione magnetica per stazione energia	29
Figura 5.10: curve isolivello del valore di induzione magnetica per stazione energia – Dettaglio	30
Figura 5.11: modello geometrico per stazione di testa	31
Figura 5.12: curve isolivello del valore di induzione magnetica per cabina di testa – Quota 1.5m	32
Figura 5.13: curve isolivello del valore di induzione magnetica per cabina di testa – Quota 0m	33
Figura 5.14: curve isolivello induzione magnetica per linea AAT	35
Figura 5.15: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno per linea 380kV	35
Figura 5.16: tipico di buca giunti	36
Figura 5.17: curve isolivello induzione magnetica per buca giunti linea AAT (il livello 0 rappresenta il piano di posa del cavo)	37
Figura 5.18: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno della buca giunti per linea 380kV	37
Figura 5.19: curve isolivello induzione magnetica per linea AT	38
Figura 5.20: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno per linea 150kV	39
Figura 5.21: curve isolivello induzione magnetica per buca giunti linea AT (il livello 0 rappresenta il piano di posa del cavo)	39
Figura 5.22: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno della buca giunti per linea 380kV	40
Figura 5.23: curve isolivello sezione 380kV quota 1.5m da piano campagna (il contorno rappresenta la recinzione della stazione)	42
Figura 5.24: rappresentazione valori induzione per sezione 380kV	43
Figura 5.25: : curve isolivello sezione 150kV quota 1.5m da piano campagna (il contorno rappresenta la recinzione della stazione)	44
Figura 5.26: rappresentazione valori induzione per sezione 150kV	45
Figura 5.27: curve iso induzione per cabina MT di sottostazione, quota 1.5m da piano di campagna	46
Figura 5.28: curve iso induzione per cabina MT di sottostazione, quota 0m da piano di campagna	47

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 3
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	

Figura 5.29: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno per linee MT in uscita da SSTS.....	47
Figura 5.30: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno per linee MT in uscita da trasformatore AT/MT.....	48
Figura 5.31: curve iso induzione magnetica per la SSTN (Il contorno in grassetto rappresenta la recinzione della stazione).....	49
Figura 5.32: mappa 2D induzione magnetica SSTN	50
Figura 5.33: mappa 3D induzione magnetica SSTN	51
Figura 5.34: curve iso induzione magnetica sul piano XZ in corrispondenza dei conduttori AT	51
Figura 5.35: mappa 2D induzione magnetica sul piano XZ.....	51

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1.1: Documenti tecnici di dettaglio.....	4
Tabella 2.1: coordinate geografiche del campo fotovoltaico	6
Tabella 2.2: coordinate geografiche SST	6
Tabella 2.3: sottocampi sottesi a SSTS	8
Tabella 2.4: sottocampi sottesi a SSTN	8
Tabella 2.5: caratteristiche linee MT distribuzione primaria da SSTS.....	9
Tabella 2.6: caratteristiche linee MT distribuzione primaria.....	10
Tabella 2.7: caratteristiche sottocampi.....	11

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 4
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	

1. PREMESSA

La finalità del presente documento è la definizione dell'influenza dei campi elettromagnetici emessi dalle installazioni elettriche di bassa tensione e media tensione e per le sottostazioni afferenti al campo agrivoltaico installato a terra, da connettere alla rete elettrica in alta tensione alla tensione di 380kV del Gestore di Rete Terna, avente una potenza di picco in corrente continua pari a 358,37 MWp, localizzato nel comune di Sassari, Regione Sardegna da realizzare su terreni meglio evidenziati sugli elaborati grafici. Le descrizioni tecniche dettagliate nonché le relazioni specialistiche e di calcolo per gli impianti elettrici sono oggetto dei seguenti documenti ai quali si rimanda per approfondimenti:

ELENCO DOCUMENTI TECNICI

Relazione tecnica descrittiva opere elettriche MT, BT, CC	BI028F-D-PAL-RT13
Relazione tecnica specialistica e relazione di calcolo opere elettriche MT, BT, CC	BI028F-D-PAL-RT14
Relazione tecnica descrittiva opere elettriche SSE	BI028F-D-PAL-RT15
Relazione di calcolo opere elettriche SST	BI028F-D-PAL-RT16

Tabella 1.1: Documenti tecnici di dettaglio

2. DESCRIZIONE TECNICA DELL'IMPIANTO

L'impianto in oggetto verrà realizzato nelle zone rappresentate in Figura 2.1: Planimetria generale di progetto.

L'impianto è suddiviso in 23 sottocampi facenti capo a due sottostazioni di trasformazione.

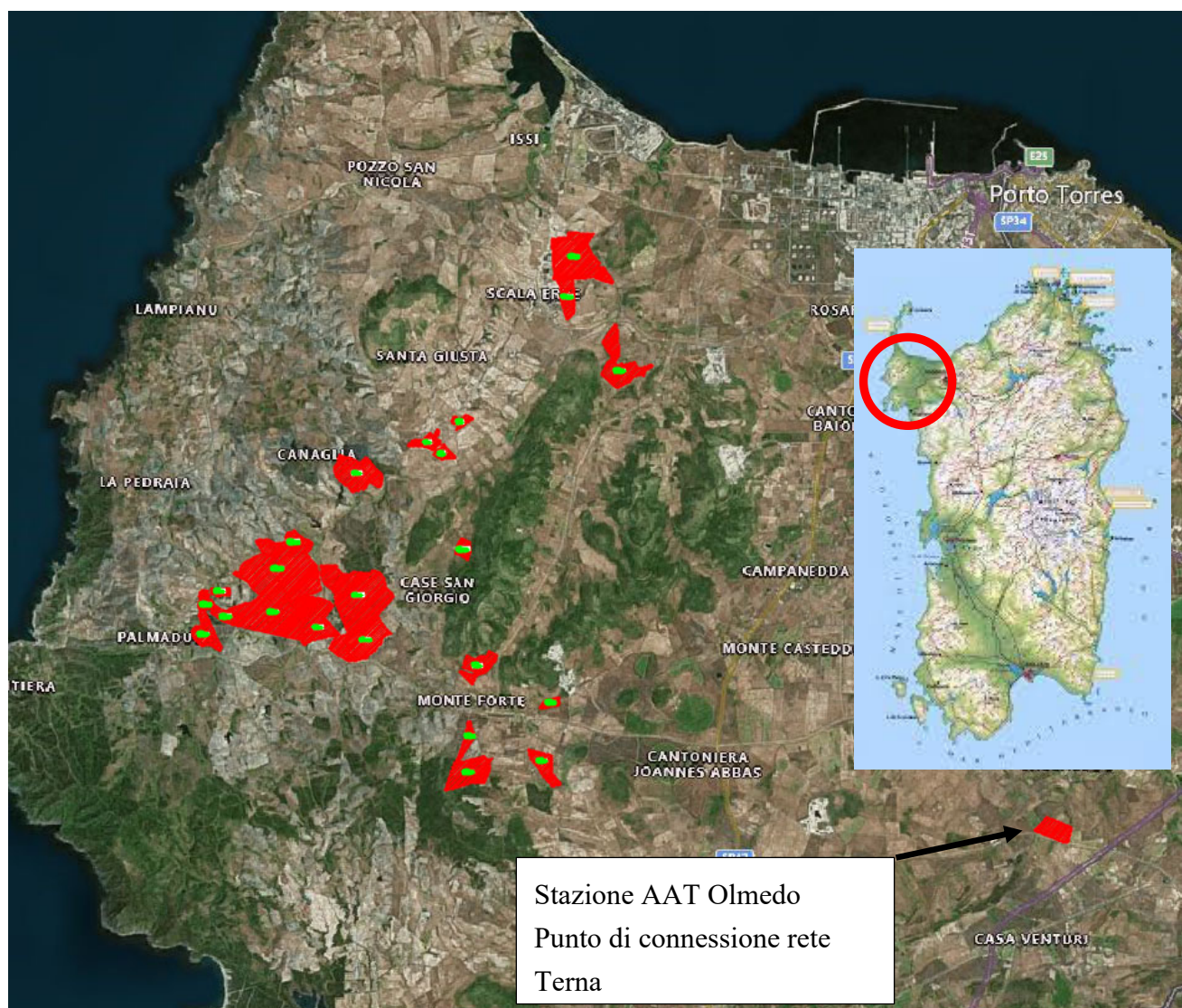


Figura 2.1: Planimetria generale di progetto

Le coordinate dei siti di intervento sono riportate nelle seguenti tabelle:

IMPIANTO FOTOVOLTAICO

Zona	Latitudine	Longitudine
Scala Erre 1	40,8220506	8,2882642
Scala Erre 2	40,8149016	8,2888623
Scala Erre 3	40,8008963	8,3011035
Lipiani 1	40,7902409	8,2623027
Lipiani 2	40,7845316	8,2583955
Lipiani 3	40,7867329	8,2547087
San Giorgio 1	40,7664541	8,263016
Canaglia 1	40,781284	8,2379542
Palmadula 1	40,7503802	8,2003524
Palmadula 2	40,7560576	8,1993484
Palmadula 3	40,7578333	8,2034025
Palmadula 4	40,7536194	8,2037134
Palmadula 5	40,7543495	8,2169371
Palmadula 6	40,7508883	8,2286931
Palmadula 7	40,7494123	8,2397502
Palmadula 8	40,7571538	8,2375177
Palmadula 9	40,7622768	8,219569
Palmadula 10	40,7672984	8,2214771
La Corte 1	40,7444461	8,267227
La Corte 2	40,73748	8,2855067
La Corte 3	40,7259368	8,2835343
La Corte 4	40,7257567	8,2677517
La Corte 5	40,7311108	8,2597469

Tabella 2.1: coordinate geografiche del campo fotovoltaico

SOTTOSTAZIONE AT/MT

Sottostazione	Latitudine	Longitudine
SST SUD	40,7560	8,2237
SST NORD	40,8171	8,2870

Tabella 2.2: coordinate geografiche SST

Nel seguito si descrivono in maniera sintetica le caratteristiche dell'impianto rimandando ai documenti di cui in Tabella 1.1 per approfondimenti tecnici.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 7
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	

2.1. Sottostazione AT/MT

L'impianto in oggetto ha origine dalla stazione AAT di Terna di Olmedo (attualmente in fase di progettazione) all'interno della quale sarà previsto uno stallo alla tensione di 380kV (punto di connessione dell'impianto alla rete di distribuzione di Terna).

L'impianto in oggetto prevede la realizzazione di due sottostazioni di trasformazione:

Sottostazione sud

E la sottostazione principale dell'impianto e sarà connessa alla stazione di Olmedo mediante linea in cavo interrato alla tensione di 380kV.

Nella sottostazione sud avviene il primo salto di tensione da 380kV a 150kV mediante due autotrasformatori di potenza 250MVA.

Una linea in cavo interrato alla tensione di 150kV collega la sottostazione sud con la sottostazione nord.

Inoltre in sottostazione sud avviene il secondo salto di tensione da 150kV a 30kV mediante tre trasformatori AT/MT 150/30kV di potenza 100MVA ciascuno con relativo quadro di distribuzione di media tensione dal quale hanno origine le linee per la connessione dei sottocampi.

Infine in sottostazione sud è previsto anche il sistema BESS di potenza 41,25MW e capacità di accumulo di 82,56MW/h.

Nella tabella sottostante sono riportate le linee sottese a ciascun trasformatore:

<u>Stazione SUD</u>	<u>Potenza [MVA]</u>
TR1	
BESS_1	13,75
Palmadula 1	10,23
Palmadula 2	3,27
Palmadula 3	1,78
Palmadula 4	1,98
Palmadula 9	56,43
Canaglia 1	16,83
	104,27
TR2	
BESS_2	13,75
Palmadula 5	51,81
La Corte 1	10,56

La Corte 2	3,63
La Corte 3	15,51
La Corte 4	3,93
La Corte 5	3,96
	103,15
TR3	
BESS_3	13,75
Palmadula 6	23,76
Palmadula 7	29,37
Palmadula 8	27,72
Palmadula 10	7,92
	102,52

Tabella 2.3: sottocampi sottesi a SSTs

Sottostazione nord

È la sottostazione di trasformazione secondaria.

In sottostazione nord è prevista l'installazione di un trasformatore AT/MT 150/30kV di potenza 100MVA con relativo quadro di distribuzione di media tensione dal quale hanno origine le linee per la connessione dei sottocampi.

Nella tabella sottostante sono riportate le linee sottese al trasformatore:

<u>Stazione NORD</u>	<u>Potenza [MVA]</u>
TR1	
San Giorgio 1	5,58
Lipiani 2 e Lipiani 3	12,87
Scala Erre 3	19,14
Lipiani 1	3,6
Scala Erre 1	26,07
Scala Erre 2	9,9
	77,16

Tabella 2.4: sottocampi sottesi a SSTN

Ogni sottostazione è equipaggiata con tutti i dispositivi di protezione, misura, supervisione e telecomando previsti dal Codice di Rete Terna e dalla norma CEI 0-16

2.2. Suddivisione delle zone e rete primaria MT

Il campo fotovoltaico è suddiviso in 23 sottocampi più uno storage, ciascuno dei quali connesso alla rispettiva SST tramite linea MT dedicata. Per i sottocampi di potenza maggiore di 26MW è prevista la connessione con due linee separate.

Le linee MT hanno origine dal quadro MT di SST e sono realizzate con cavo ARE4H5E 18/30 kV con posa interrata alla profondità di circa 1.2m dal piano di campagna. La posa è diretta nel terreno e la protezione meccanica è realizzata con coppelle in cemento.

Il percorso si svolge sostanzialmente per l'intero sviluppo su strade comunali/provinciali.

Ogni linea si attesta su quadro di distribuzione MT di zona installato in cabina MT denominata "Cabina di testa".

Le linee MT che chiameremo linee di distribuzione primaria MT sono le seguenti:

LINEE DI DISTRIBUZIONE PRIMARIA MT PER SSTs

DENOMINAZIONE LINEA	LUNGHEZZA	SEZIONE/MATERIALE
BESS	500	3(2x120mm ²) / Al
Palmadula 5A - C8	500m	3(2x120mm ²) / Al
Palmadula 5B - C9	1600m	3(2x185mm ²) / Al
Palmadula 5C - C10	2100m	3(2x185mm ²) / Al
La Corte 3 - C27	7400m	3(2x185mm ²) / Al
La Corte 1 - C25	6000	3(2x185mm ²) / Al
BESS	500	3(2x120mm ²) / Al
Palmadula 8A - C23	1300	3(2x185mm ²) / Al
Palmadula 8B - C24	2100	3(1x185mm ²) / Al
Palmadula 7A - C21	2000	3(2x185mm ²) / Al
Palmadula 7B - C22	2550	3(2x185mm ²) / Al
Palmadula 6A - C19	900	3(2x120mm ²) / Al
Palmadula 6B - C20	2100	3(1x185mm ²) / Al
Palmadula 10 - C14	2100	3(1x185mm ²) / Al
BESS	500	3(2x120mm ²) / Al
Palmadula 9A - C11	800	3(2x185mm ²) / Al
Palmadula 9B - C12	1400	3(2x185mm ²) / Al
Palmadula 9C - C13	2200	3(2x185mm ²) / Al
Canaglia 1 - C30	4600	3(2x120mm ²) / Al
Palmadula 4 - C15	4500	3(2x185mm ²) / Al

Tabella 2.5: caratteristiche linee MT distribuzione primaria da SSTs

LINEE DI DISTRIBUZIONE PRIMARIA MT PER SSTN

DENOMINAZIONE LINEA	LUNGHEZZA	SEZIONE/MATERIALE
Scala Erre 1 – C1	435m	3(2x300mm ²) / Al
Scala Erre 2 – C2	120m	3(1x185mm ²) / Al
Scala Erre 3 – C3	3670m	3(2x185mm ²) / Al
Li Piani 1 – C4	4480m	3(2x300mm ²) / Al

Tabella 2.6: caratteristiche linee MT distribuzione primaria

2.3. Campo fotovoltaico

Come già detto al paragrafo precedente, il campo fotovoltaico è suddiviso in 23 sottocampi

DENOMINAZIONE ZONA (SOTTO-CAMPO)	NUMERO TRACKER	POTENZA C.C. [MWP]	N INVERTER	POTENZA A.C. IN USCITA DA INVERTER [MVA]	N. CABINE SECONDARIE/PO-TENZA	SOTTOSTAZIONE DI PROVENIENZA
Scala Erre 1	1.418	27,19	80	26,07	2x9000kVA 1x6600kVA	SSTN
Scala Erre 2	532	10,20	30	9,9	1x9000kVA	SSTN
Scala Erre 3	1.035	19,85	58	19,14	2x9000kVA	SSTN
Lipiani 2 e Lipiani 3	691	13,25	39	12,87	2x6600kVA 1x3300kVA	SSTN
San Giorgio 1	291	5,58	17	5,58	1x6600kVA	SSTN
Lipiani 1	188	3,60	11	3,60	1x3300kVA	SSTN
BESS1	-	13,75	-	13,75	-	SSTS
Palmadula 1	544	10,43	31	10,23	1x6600kVA 1x3300kVA	SSTS
Palmadula 2	171	3,28	10	3,27	1x3300kVA	SSTS
Palmadula 3	93	1,78	6	1,78	1x3300kVA	SSTS
Palmadula 4	104	1,99	6	1,98	1x3300kVA	SSTS
Palmadula 9	3070	58,88	171	56,43	5x9000kVA 1x6600kVA	SSTS
Canaglia 1	908	17,41	51	16,83	1x9000kVA 1x6600kVA	SSTS

DENOMINAZIONE ZONA (SOTTO-CAMPO)	NUMERO TRACKER	POTENZA C.C. [MWP]	N INVERTER	POTENZA A.C. IN USCITA DA INVERTER [MVA]	N. CABINE SECONDARIE/PO-TENZA	SOTTOSTA-ZIONE DI PROVE-NIENZA
BESS2	-	13,75	-	13,75	-	SSTS
Palmadula 5	2810	53,89	157	51,81	5x9000kVA 1x3300kVA	SSTS
La Corte 1	573	10,99	32	10,56	1x6600kVA 1x3300kVA	SSTS
La Corte 2	195	3,74	11	3,63	1x3300kVA	SSTS
La Corte 3	830	15,91	47	15,51	1x9000kVA 1x6600kVA	SSTS
La Corte 4	205	3,93	12	3,93	1x6600kVA	SSTS
La Corte 5	216	4,14	13	3,96	1x6600kVA	SSTS
BESS3	-	13,75	-	13,75	-	SSTS
Palmadula 6	1288	24,70	72	23,76	2x9000kVA 1x6600kVA	SSTS
Palmadula 7	1591	30,51	89	29,37	3x9000kVA	SSTS
Palmadula 8	1504	28,84	84	27,72	3x9000kVA	SSTS
Palmadula 10	428	8,20	25	7,92	1x9000kVA	SSTS
TOTALE	18.685	358,37	1052	345,85		

Tabella 2.7: caratteristiche sottocampi

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 12
			RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI	

3. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Nella stesura del presente documento si è fatto riferimento alle seguenti disposizioni legislative e normative:

Disposizioni legislative

DECRETO DEL MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI-16 gennaio 1991:

Aggiornamento delle norme tecniche per la disciplina della costruzione e dell'esercizio di linee elettriche aeree esterne. (Gazzetta Ufficiale, Serie generale, n. 40, 16-2-1991)

DECRETO DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI-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. (Gazzetta Ufficiale, Serie generale, n.104, 6-5-1992).

DECRETO DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI-28 settembre 1995:

Norme tecniche procedurali di attuazione del decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 23 aprile 1992 relativamente agli elettrodotti. (Gazzetta Ufficiale, Serie generale, n. 232, 4-10-1995)

LEGGE 22 febbraio 2001 N°36:

Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici. (Gazzetta Ufficiale n. 55 del 7 marzo 2001).

DECRETI ATTUATIVI legge 36/2001:

DECRETO DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI 8 luglio 2003 (Gazzetta Ufficiale serie generale n°199 del 28/8/03)

Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici generati a frequenze comprese tra 100 kHz e 300 GHz.

DECRETO DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI 8 luglio 2003 (Gazzetta Ufficiale serie generale n°200 del 28/8/03)

Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 13
			RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI	

DECRETO DEL MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE N. 29 maggio 2008

(Supplemento ordinario n.160 alla Gazzetta ufficiale 5 luglio 2008 n. 156) Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti.

DECRETO LEGISLATIVO 81/2008 TITOLO VIII, CAPO IV e s.m.i.

Protezione dei lavoratori dai rischi di esposizione a campi elettromagnetici

Norme applicabili

CEI 106-11 fasc. 8149 01/02/2006: Guida per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti secondo le disposizioni del DPCM 8 luglio 2003 (Art. 6) Parte 1: Linee elettriche aeree e in cavo

CEI 106-12 fasc. 8289 01/05/2006: Guida pratica ai metodi e criteri di riduzione dei campi magnetici prodotti dalle cabine elettriche MT/BT

CEI EN 62311 (CEI 106-19) fasc. 9420 01/07/2008: Valutazione degli apparecchi elettronici ed elettrici in relazione ai limiti di base per l'esposizione umana ai campi elettromagnetici (0 Hz - 300 GHz)

CEI 111-1 fasc. 3160 R 01/06/1997: Esposizione umana ai campi elettromagnetici ad alta frequenza - Rapporto informativo

CEI 211-4 fasc. 9482 01/09/2008: Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee e da stazioni elettriche

CEI 211-6 fasc. 5908 01/01/2001: Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz - 10 kHz, con riferimento all'esposizione umana

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 14
			RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI	

CEI 211-7 fasc. 5909 01/01/2001: Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz - 300 GHz, con riferimento all'esposizione umana

CENELEC EN 50499:2008: Procedure for the assessment of the exposure of workers to electromagnetic fields

In particolare il riferimento per la valutazione delle influenze elettromagnetiche delle infrastrutture elettriche di impianto è il DPCM 8 luglio 2003 nel quale vengono fissati i limiti di esposizione e i valori di attenzione per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete industriale e connessi al funzionamento e all'esercizio degli elettrodotti.

I limiti imposti sono deducibili nel DPCM e sono riportati nei seguenti estratti del Decreto:

Art. 3. Limiti di esposizione e valori di attenzione

1. Nel caso di esposizione a campi elettrici e magnetici alla frequenza di 50 Hz generati da elettrodotti, non deve essere superato il limite di esposizione di 100 μ T per l'induzione magnetica e 5 kV/m per il campo elettrico, intesi come valori efficaci.
2. A titolo di misura di cautela per la protezione da possibili effetti a lungo termine, eventualmente connessi con l'esposizione ai campi magnetici generati alla frequenza di rete (50 Hz), nelle aree gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere, si assume per l'induzione magnetica il valore di attenzione di 10 μ T, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

Art. 4. Obiettivi di qualità

1. 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 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 ai campi elettrici e magnetici generati dagli elettrodotti operanti alla frequenza di 50 Hz, è 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 nelle normali condizioni di esercizio.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BIO28F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 15
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	

4. DEFINIZIONI

Nel presente documento vengono adottate le seguenti definizioni e le seguenti grandezze fisiche:

Assorbimento specifico di energia (SA)

È definito come l'energia assorbita per unità di massa di tessuto biologico e si esprime in joule per chilogrammo (J/kg)

Campo elettrico (E)

Il campo elettrico creato in vicinanza di un conduttore in tensione è un vettore la cui intensità è indicata con E. Questa quantità è la forza esercitata da un campo elettrico su una carica unitaria ed è misurata in volt per metro (V/m). Nel caso di campi variabili in modo sinusoidale, il vettore E o oscilla lungo un asse fisso (sorgente mono-fase) oppure ruota in un piano e descrive un'ellisse (sorgenti poli-fasi o sorgenti multiple sincrone). Poiché il campo elettrico in prossimità di oggetti conduttori (incluse le persone) è generalmente perturbato da tali oggetti, il valore del "campo elettrico imperturbato" (cioè il campo che esisterebbe in assenza di oggetti mobili e di persone) sarà usato per caratterizzare le condizioni di esposizione.

Campo magnetico (Induzione magnetica B, intensità del campo magnetico H)

Il campo magnetico è una quantità vettoriale. Come nel caso dei campi elettrici, questo vettore o oscilla lungo un asse fisso (sorgente mono-fase) oppure ruota su un piano e descrive un'ellisse (sorgenti poli-fasi o sorgenti multiple sincrone). L'intensità del campo magnetico, H, è espressa in ampere per metro (A/m). Tuttavia, la densità di flusso magnetico, B, comunemente chiamata induzione magnetica, è spesso usata per caratterizzare i campi magnetici, in particolare nel contesto degli effetti biologici. L'induzione magnetica è definita in termini di forza esercitata su una carica che si muove nel campo e ha come unità il Tesla (T). Un Tesla è equivalente a 1 Vs/m² o 1 weber per metro quadrato (Wb/m²). Esiste una differenza importante fra i campi B e H, in particolare nei materiali magnetici. Tuttavia, nel vuoto, e ai fini pratici nell'aria e nel tessuto biologico, il rapporto B/H è una costante. Questo rapporto è la permeabilità magnetica del vuoto, $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ Vs/Am o Henry per metro (H/m). Quindi nel vuoto, nell'aria o nel tessuto biologico, un'induzione magnetica di 1 mT corrisponde a un'intensità del campo magnetico di $104/4\pi$ A/m, o quasi 800 A/m.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 16
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	

Corrente di contatto (IC)

La corrente di contatto è la corrente alternata che fluisce attraverso un corpo umano a seguito del contatto con un oggetto conduttore accoppiato ad un campo elettrico o magnetico.

Corrente indotta attraverso gli arti (IL)

È definita come la corrente indotta attraverso qualsiasi arto, a frequenze comprese tra 10 e 110 MHz ed è espressa in ampere (A)

Densità di corrente (J)

La densità di corrente è una quantità vettoriale la cui intensità è uguale alla carica che attraversa nell'unità di tempo una superficie unitaria perpendicolare al flusso di carica. La densità di corrente è espressa in ampere per metro quadrato (A/m²).

Densità di potenza (S)

È definita come la potenza radiante incidente perpendicolarmente ad una superficie, divisa per l'area della superficie stessa. È espressa in W/m². si utilizza per frequenze molto alte per le quali la penetrazione nel corpo è modesta.

Distanza di Prima Approssimazione (DPA):

Per le linee è 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 della DPA si trovi all'esterno delle fasce di rispetto.

Per la cabina è la distanza in pianta sul livello del suolo, da tutte le pareti della cabina stessa che garantisce i requisiti di cui sopra.

Effetti biofisici diretti

Effetti provocati direttamente nel corpo umano a causa della sua presenza all'interno di un campo elettromagnetico, che comprendono:

1) effetti termici, quali il riscaldamento dei tessuti a causa dell'assorbimento di energia dai campi elettromagnetici nei tessuti medesimi;

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 17
			RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI	

2) effetti non termici, quali la stimolazione di muscoli, nervi e organi sensoriali. Tali effetti possono essere di detrimento per la salute mentale e fisica dei lavoratori esposti. Inoltre, la stimolazione degli organi sensoriali può comportare sintomi transitori quali vertigini e fosfeni.

Inoltre, tali effetti possono generare disturbi temporanei ed influenzare le capacità cognitive o altre funzioni cerebrali o muscolari e possono, pertanto, influire negativamente sulla capacità di un lavoratore di operare in modo sicuro;

3) correnti negli arti.

Effetti indiretti

Effetti provocati dalla presenza di un oggetto in un campo elettromagnetico, che potrebbe essere causa di un pericolo per la salute e sicurezza, quali:

- 1) interferenza con attrezzature e dispositivi medici elettronici, compresi stimolatori cardiaci e altri impianti o dispositivi medici portati sul corpo;
- 2) rischio propulsivo di oggetti ferromagnetici all'interno di campi magnetici statici;
- 3) innesco di dispositivi elettro-esplosivi (detonatori);
- 4) incendi ed esplosioni dovuti all'accensione di materiali infiammabili a causa di scintille prodotte da campi indotti, correnti di contatto o scariche elettriche;
- 5) correnti di contatto.

Fascia di rispetto

È 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.

Limiti di esposizione (D.P.C.M. 8 luglio 2003)

Valori di campo elettrico e magnetico che non devono essere mai superati.

Ai sensi dei D.P.C.M. 8 luglio 2003 i valori sono così definiti:

Frequenza 50Hz: 5kV/m per il campo elettrico e 100μT per l'induzione magnetica;

Per le frequenze più elevate i limiti di esposizione sono riassunti nella seguente tabella:

	Intensità di campo elettrico E [V/m]	Intensità di campo magnetico H [A/m]	Densità di potenza D [W/m ²]
0,1 < f ≤ 3 MHz	60	0,2	-
3 < f ≤ 3000 MHz	20	0,05	1
3 < f ≤ 300 GHz	40	0,01	4

Obiettivi di qualità (D.P.C.M. 8 luglio 2003)

Valori di campo magnetico che, 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 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 non devono essere mai superati.

Ai sensi dei D.P.C.M. 8 luglio 2003 i valori sono così definiti:

Frequenza 50Hz: 3μT per l'induzione magnetica (da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio);

Per le frequenze più elevate i limiti di esposizione sono riassunti nella seguente tabella:

	Intensità di campo elettrico E [V/m]	Intensità di campo magnetico H [A/m]	Densità di potenza D [W/m ²]
0,1 < f ≤ 300 GHz	6	0,016	0,1 (3MHz < f ≤ 300 GHz)

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 19
			RELAZIONE CAMPI Elettromagnetici	

Valori di attenzione (D.P.C.M. 8 luglio 2003)

Valore di campo magnetico che a titolo di misura di cautela per la protezione da possibili effetti a lungo termine nelle aree gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere non devono essere superati.

Ai sensi dei D.P.C.M. 8 luglio 2003 i valori sono così definiti:

Frequenza 50Hz: 10μT per l'induzione magnetica (da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio);

Per le frequenze più elevate i limiti di esposizione sono riassunti nella seguente tabella:

	Intensità di campo elettrico E [V/m]	Intensità di campo magnetico H [A/m]	Densità di potenza D [W/m ²]
0,1 < f ≤ 300 GHz	6	0,016	0,1 (3MHz < f ≤ 300 GHz)

Valore efficace del campo

I campi elettrici e magnetici alternati sono, generalmente, polarizzati ellitticamente e ciascuno di essi può essere descritto in termini di componenti lungo tre assi ortogonali che variano nel tempo con regime sinusoidale. Il valore efficace del campo (root mean square (rms) in inglese) è la radice quadrata della somma dei quadrati dei valori efficaci di queste tre componenti.

Cioè, per un campo elettrico:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

dove Ex, Ey, Ez sono i valori efficaci delle tre componenti considerate. Una espressione simile si applica ai campi magnetici.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 20
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	

5. VALUTAZIONE DEI CAMPI ELETTRICI PER LE INSTALLAZIONI ELETTRICHE

La guida CEI 106-11 descrive i metodi semplificati per la determinazione dell'induzione magnetica in casi di linee elettriche interrate o aeree e con geometrie semplificate.

Il DM 29 maggio 2008 ha approvato le linee guida APAT che descrivono i metodi di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti.

Nel caso in esame le geometrie delle linee e delle cabine e, per quanto riguarda le cabine, le potenze dei trasformatori non sono riconducibili ai casi indicati sui sopracitati documenti per cui si è preferito utilizzare uno specifico software.

Il DM 29-05-2008 all'art. 5.1.2 afferma che i modelli tridimensionali non sono ancora standardizzati ma un software di calcolo si ritiene adeguato a calcolare le fasce di rispetto con buona approssimazione quando:

- Consente di riprodurre fedelmente la posizione e la forma dei conduttori nello spazio (catenaria);
- Fornisca la distanza da terra dei conduttori, in modo che le verifiche sul campo possano confermare quanto descritto dal calcolo;
- Calcoli direttamente l'integrale di linea sulla catenaria;
- Sia validato da misure.

L'uso di software è dunque accettabile quando sia disponibile la descrizione del modello in termini di algoritmi implementati e quando siano note le condizioni al contorno e le approssimazioni attuate e quando sia attuato uno studio di confronto tra simulazione e misure.

5.1. Metodologia di calcolo

Il calcolo dei livelli di induzione magnetica è stato condotto con un apposito software di calcolo.

I calcoli sono stati effettuati con il software Magic realizzato da BEshielding S.r.l. La versione del software utilizzata è la 1.8.5.0.

I calcoli sono stati realizzati sulla base delle seguenti ipotesi:

- Tridimensionalità delle sorgenti e del profilo dei conduttori elettrici presenti. Il calcolo è effettuato mediante integrazione numerica della legge di Biot e Savart.
- Le sorgenti sono state considerate alla loro corrente nominale.
- Non si è tenuto conto degli effetti prodotti da eventuali grossi corpi ferromagnetici.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 21
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	

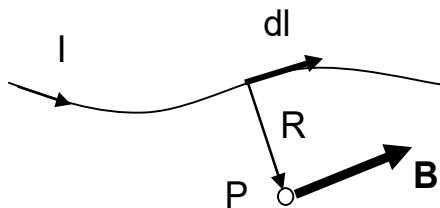
Il software è basato sull'integrazione della legge di Biot e Savart che consente di determinare in ogni punto dello spazio il valore dell'induzione magnetica B a partire dalla geometria delle linee elettriche e delle sorgenti in termini di intensità di corrente e fase.

Più dettagliatamente per un conduttore percorso da una corrente I il valore dell'induzione magnetica B nello spazio circostante è dato da:

$$\vec{B} = \mu_0 \int \frac{\vec{I} d\vec{l} \times \vec{R}}{4\pi R^3}$$

Dove:

- B è il vettore induzione magnetica
- dl è un vettore di lunghezza infinitesima, tangente al conduttore ed orientato nel verso della corrente
- R è un vettore distanza tra il punto sul conduttore ed il punto P dello spazio in cui si vuole calcolare il campo
- μ_0 è la permeabilità assoluta assunta per l'aria pari a $4\pi 10^{-7}$



L'integrazione è effettuata numericamente sommando vettorialmente i contributi ottenuti suddividendo il conduttore in un numero finito di elementi discreti.

Ciascun conduttore viene descritto da un punto di vista geometrico mediante l'equazione della curva che lo rappresenta.

L'integrale è effettuato per ogni elemento del sistema ed i contributi vengono sommati. In questo modo il metodo di calcolo è adatto per modellizzare un numero arbitrariamente grande di elementi di qualsiasi forma geometrica.

Il campo risultante è un vettore le cui componenti spaziali sono caratterizzate da un'intensità rappresentata da un numero complesso: la corrente è infatti una corrente sinusoidale.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 22
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	

5.2. Campo fotovoltaico – Circuiti in c.c.

Il contributo dei moduli fotovoltaici e dei circuiti in c.c. può ritenersi trascurabile ai fini della valutazione. I moduli operano solamente a tensione e corrente continua (frequenza nulla) e con correnti estremamente basse e la possibilità di dar luogo a campi elettromagnetici variabili può avvenire solo durante brevi transitori di corrente dovuti ad accensione e spegnimento delle apparecchiature di conversione.

5.3. Circuiti in c.a. alla tensione di 800V

I cavi di connessione agli inverter sono alla tensione di 800V e sono posati con posa interrata.

I cavi hanno una sezione di 300mm² ed un diametro massimo di 28mm.

Il calcolo, viene fatto alla massima potenza erogata in c.a. dall'inverter e cioè 330kVA che corrispondono a 238A a 800V.

Il calcolo è stato fatto ipotizzando due terne a trifoglio posizionate a 50cm di profondità e distanziate di circa 20cm.

Le isolinee a 3, 10 e 100 μ T sono indicate nella sottostante figura:

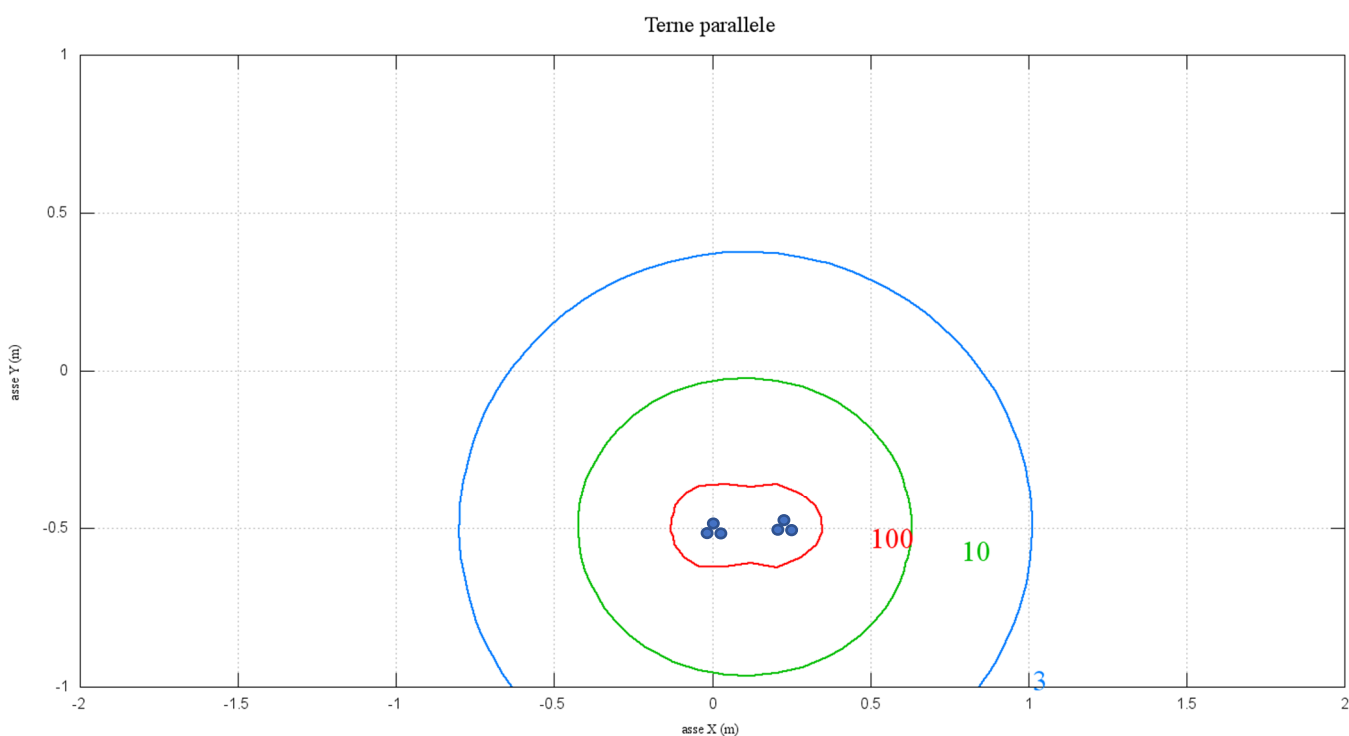


Figura 5.1: Linee isoinduzione magnetica 3, 10, 100 uT per linee BT 800V

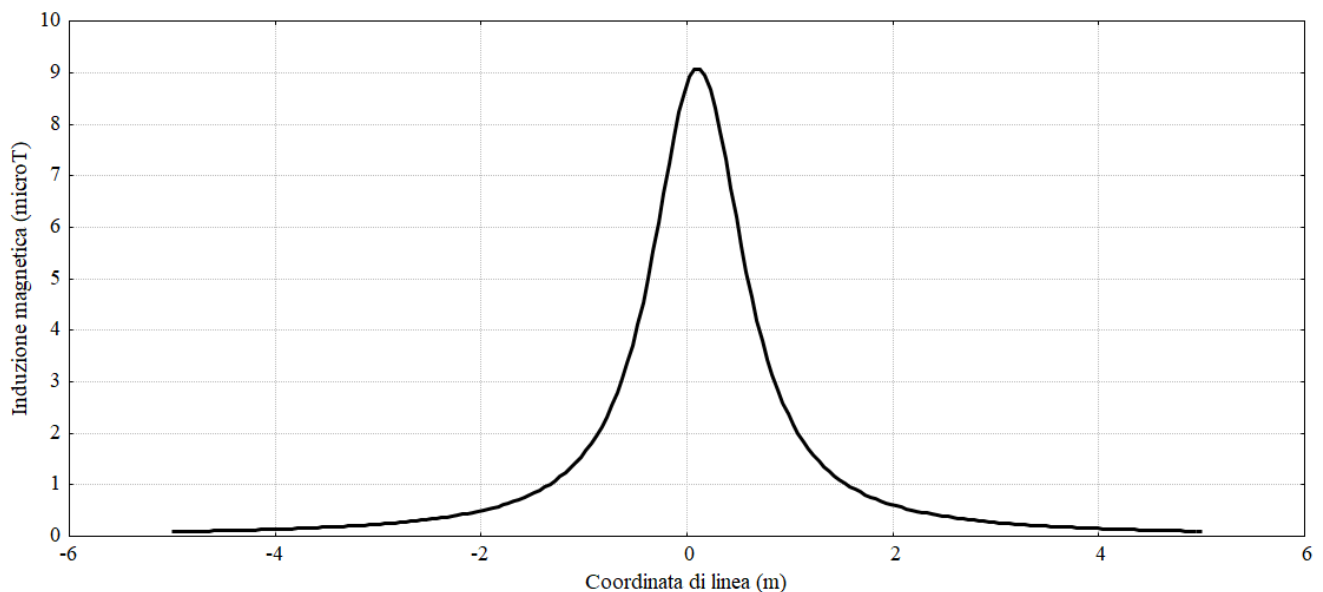


Figura 5.2: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno per linea 800Vca

Come si vede i livelli di induzione magnetica a 100 μ T e 10 μ T sono completamente sotto il livello del terreno, mentre il livello di induzione magnetica a 3 μ T è contenuto entro 1m nell'intorno dell'asse della linea. Il valore di 10 μ T non è mai superato a livello del terreno.

Le linee in questione sono interrate all'interno dei campi fotovoltaici, zone recintate e accessibili solo al personale di gestione dell'impianto e per poche ore anno.

5.4. Cavi MT alla tensione di 30kV per distribuzione secondaria

I cavi per la distribuzione secondaria MT sono eserciti alla tensione di 30kV e sono posati con posa interrata a circa 90/100cm dal piano del suolo.

I cavi hanno una sezione di 185mm² ed un diametro massimo di 38mm.

Il calcolo, come previsto ed a favore della sicurezza viene fatto alla massima portata del cavo che in questo caso, secondo quanto indicato sul catalogo del costruttore è pari a 283A.

Il calcolo è stato fatto ipotizzando due terne a trifoglio posizionate a 90cm di profondità e distanziate di circa 25cm.

Le isolinee a 3, 10 e 100 μ T sono indicate nella sottostante figura:

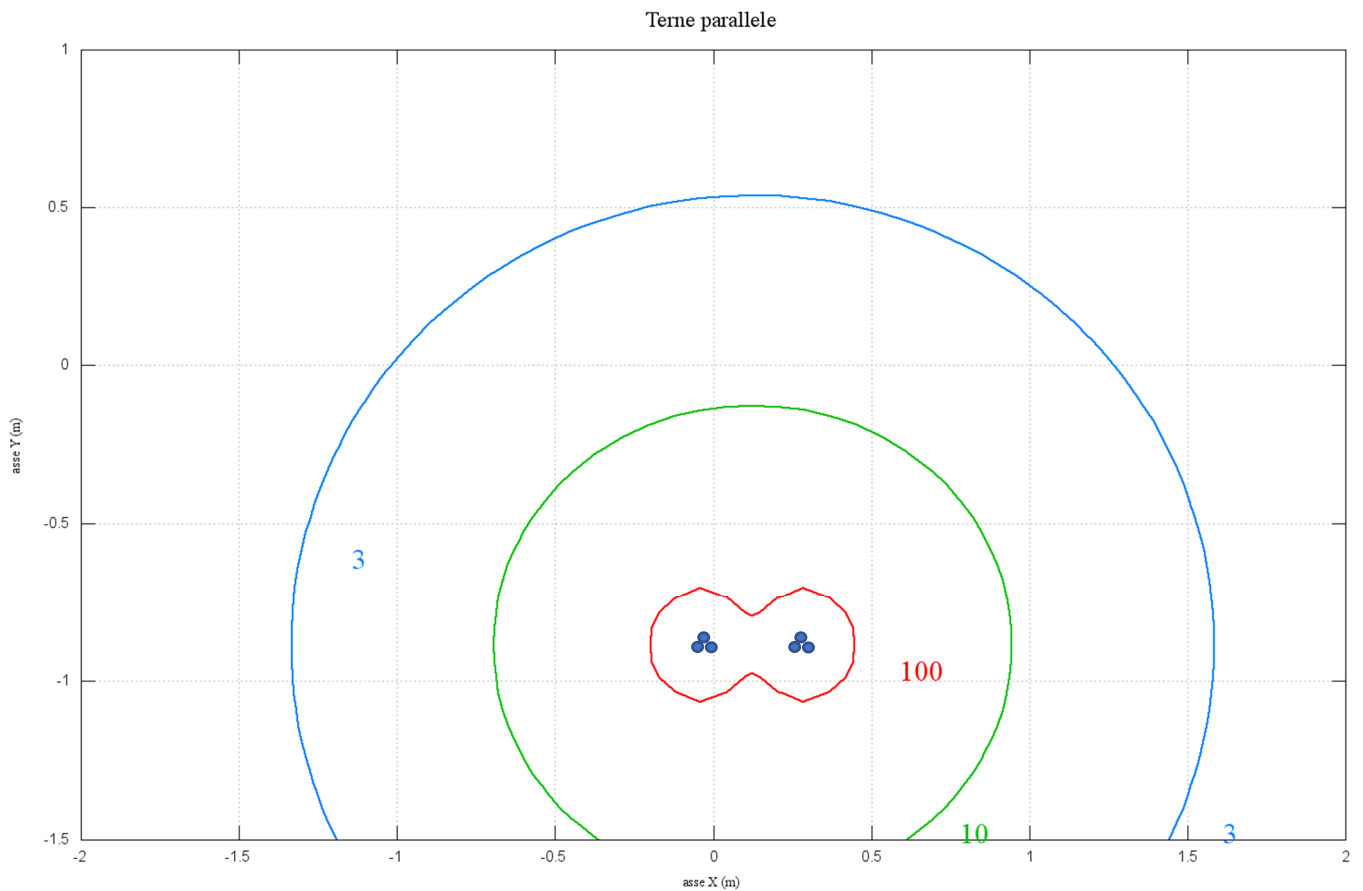


Figura 5.3: curve isoinduzione 3,10,100µT per linee 30kV di distribuzione secondaria

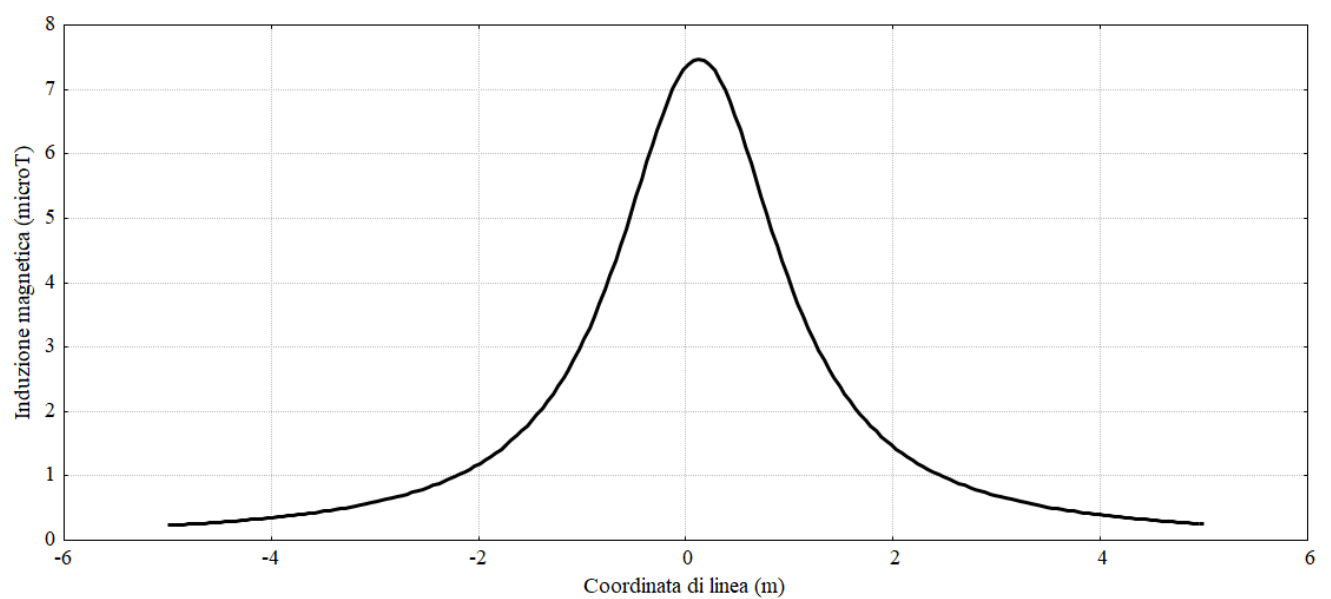


Figura 5.4: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno per linea 30kV secondaria

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 25
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	

Come si vede i livelli di induzione magnetica a 100 μ T e 10 μ T sono completamente sotto il livello del terreno, mentre il livello di induzione magnetica a 3 μ T è contenuto entro 1m nell'intorno dell'asse della linea. Il valore di 10 μ T non è mai superato a livello del terreno.

Le linee in questione sono interrate all'interno dei campi fotovoltaici, zone recintate e accessibili solo al personale di gestione dell'impianto e per poche ore anno.

5.5. Cavi MT alla tensione di 30kV per distribuzione principale

I cavi per la distribuzione primaria MT sono eserciti alla tensione di 30kV e sono posati con posa interrata a circa 90/100cm dal piano del suolo.

I cavi hanno una sezione di 240/300mm² ed un diametro massimo di 42mm per il cavo di sezione 240mm² e 45mm per il cavo di sezione 300mm².

Il calcolo, come previsto ed a favore della sicurezza viene fatto alla massima portata del cavo che in questo caso, secondo quanto indicato sul catalogo del costruttore è pari a 327A per il cavo di sezione 240mm² e 369A per il cavo di sezione 300mm².

Il calcolo è stato fatto ipotizzando cinque terne a trifoglio posizionate a 90cm di profondità e distanziate di circa 25cm.

Le isolinee a 3, 10 e 100 μ T sono indicate nella sottostante figura:

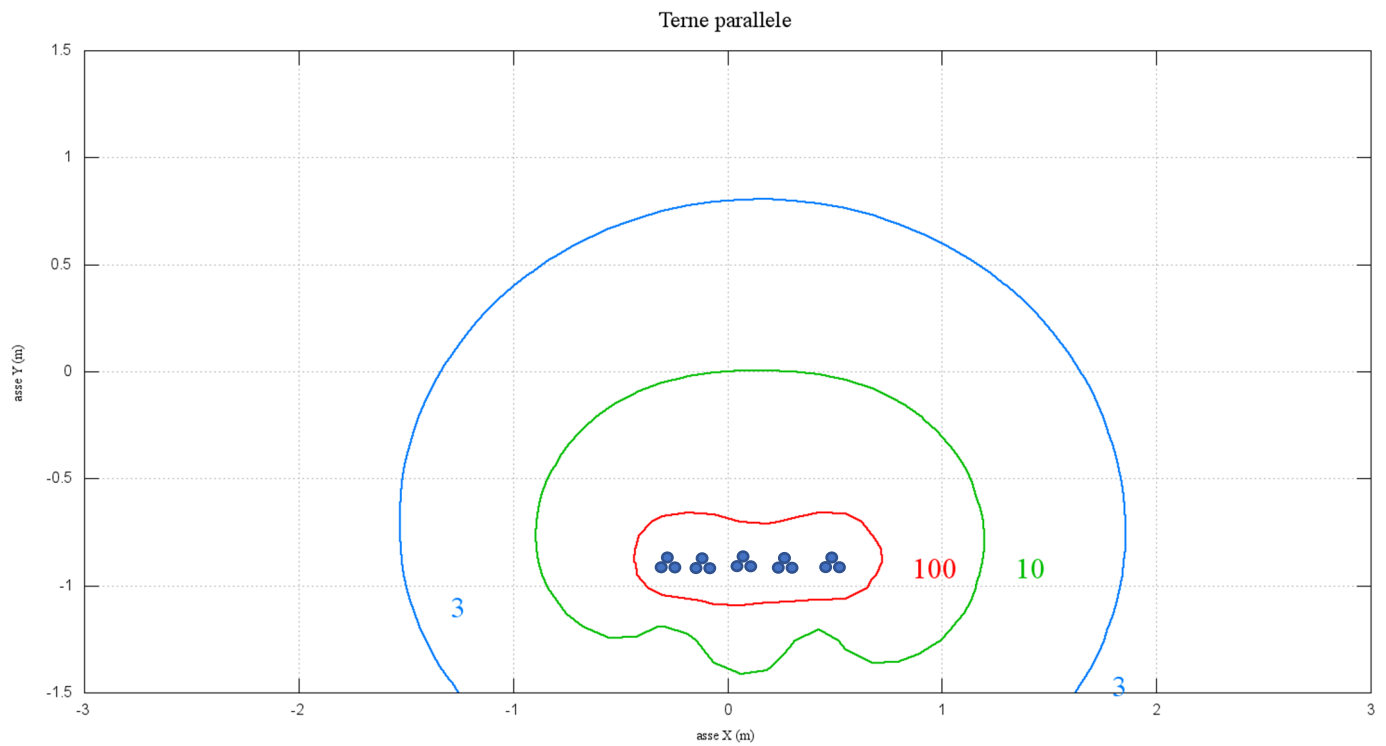


Figura 5.5: curve isoinduzione 3,10,100uT per linee 30kV di distribuzione primaria

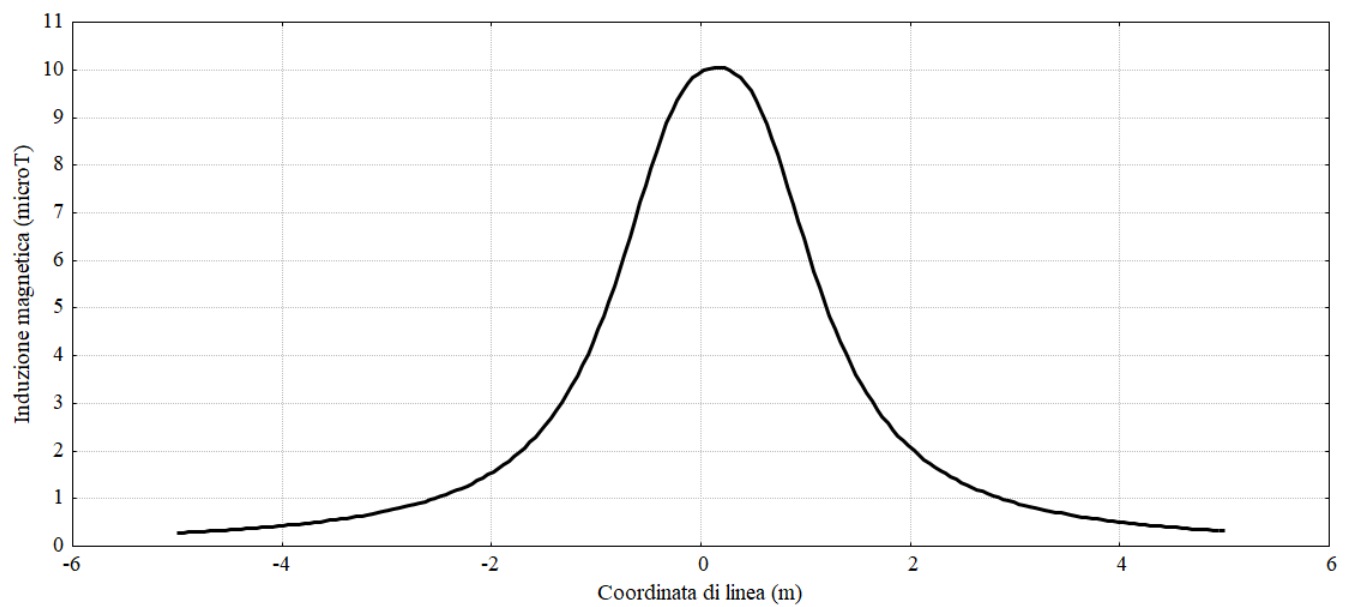


Figura 5.6: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno per linea 30kV primaria

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 27
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	

Come si vede i livelli di induzione magnetica a 100 μ T e 10 μ T sono completamente sotto il livello del terreno, mentre il livello di induzione magnetica a 3 μ T è contenuto ad una distanza inferiore a 2m nell'intorno dell'asse della linea. Il valore di 10 μ T non è mai superato a livello del terreno. Le linee in questione sono interrate su strade pubbliche dove non è prevista la presenza stabile di persone per più di 4 ore al giorno.

5.6. Cabina MT/BT (stazione di energia)

Nell'impianto sono previste tre tipologie di stazioni di energia:

- Stazione 9MVA: installata in container di dimensioni 6.2x2.5x2.9m (lpxh) contiene un quadro MT a tre scomparti (arrivo, partenza, protezione trasformatore), un trasformatore MT/BT isolato in olio di potenza 9MVA con doppio secondario 30/0.8kV, un quadro di BT con due arrivi da 4000A, e 30 partenze 3x400A per inverter su due gruppi da 15.
- Stazione 6.6MVA: installata in container di dimensioni 6.2x2.5x2.9m (lpxh) contiene un quadro MT a tre scomparti (arrivo, partenza, protezione trasformatore), un trasformatore MT/BT isolato in olio di potenza 6.6MVA con doppio secondario 30/0.8kV, un quadro di BT con due arrivi da 2900A, e 22 partenze 3x400A per inverter su due gruppi da 11.
- Stazione 3.3MVA: installata in container di dimensioni 6.2x2.5x2.9m (lpxh) contiene un quadro MT a tre scomparti (arrivo, partenza, protezione trasformatore), un trasformatore MT/BT isolato in olio di potenza 3.3MVA con singolo secondario 30/0.8kV, un quadro di BT con unico arrivo da 2900A, e 11 partenze 3x400A per inverter.

Il calcolo è stato effettuato per la stazione da 9MVA che rappresenta il caso peggiore.

Le ipotesi di calcolo sono le seguenti:

- Le correnti sul lato 30kV sono state considerate pari a 283A (massimo valore di portata del cavo di sezione 185mm²);
- La corrente sul primario del trasformatore MT/BT è stata considerata pari a 173A (massimo valore di potenza);
- Le correnti su ciascun secondario sono state considerate pari 3521A con distribuzione tramite condotto sbarra compatto.

La geometria del modello è rappresentata nelle seguenti figure:

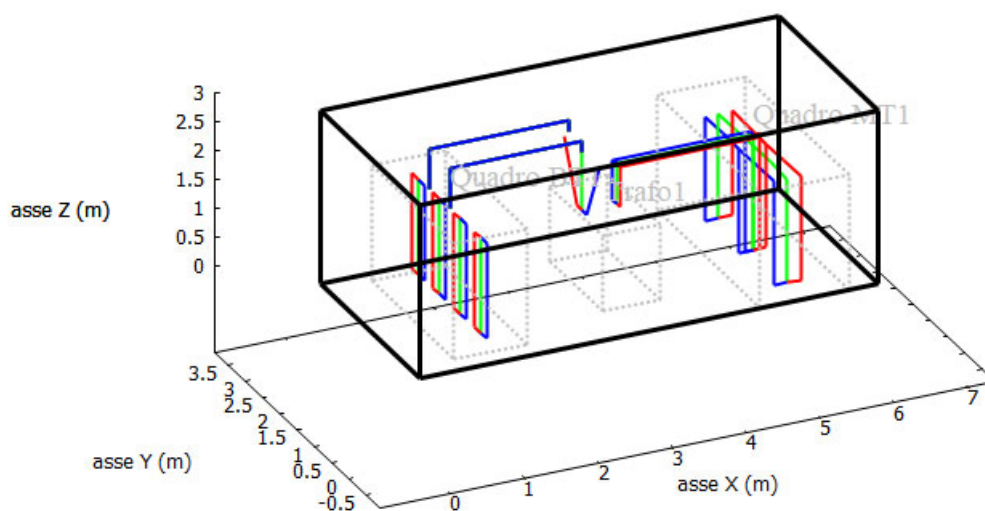


Figura 5.7: modello geometrico per stazione di energia

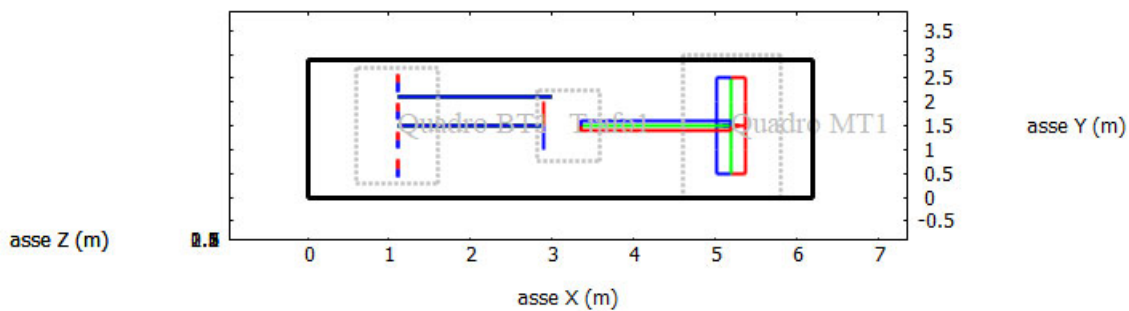


Figura 5.8: modello geometrico stazione energia - Vista dall'alto

Sulla base delle ipotesi fatte e del modello come costruito si ricavano i valori di induzione magnetica che, nelle successive figure sono rappresentate sul piano x-y a quota 1.5m dal suolo

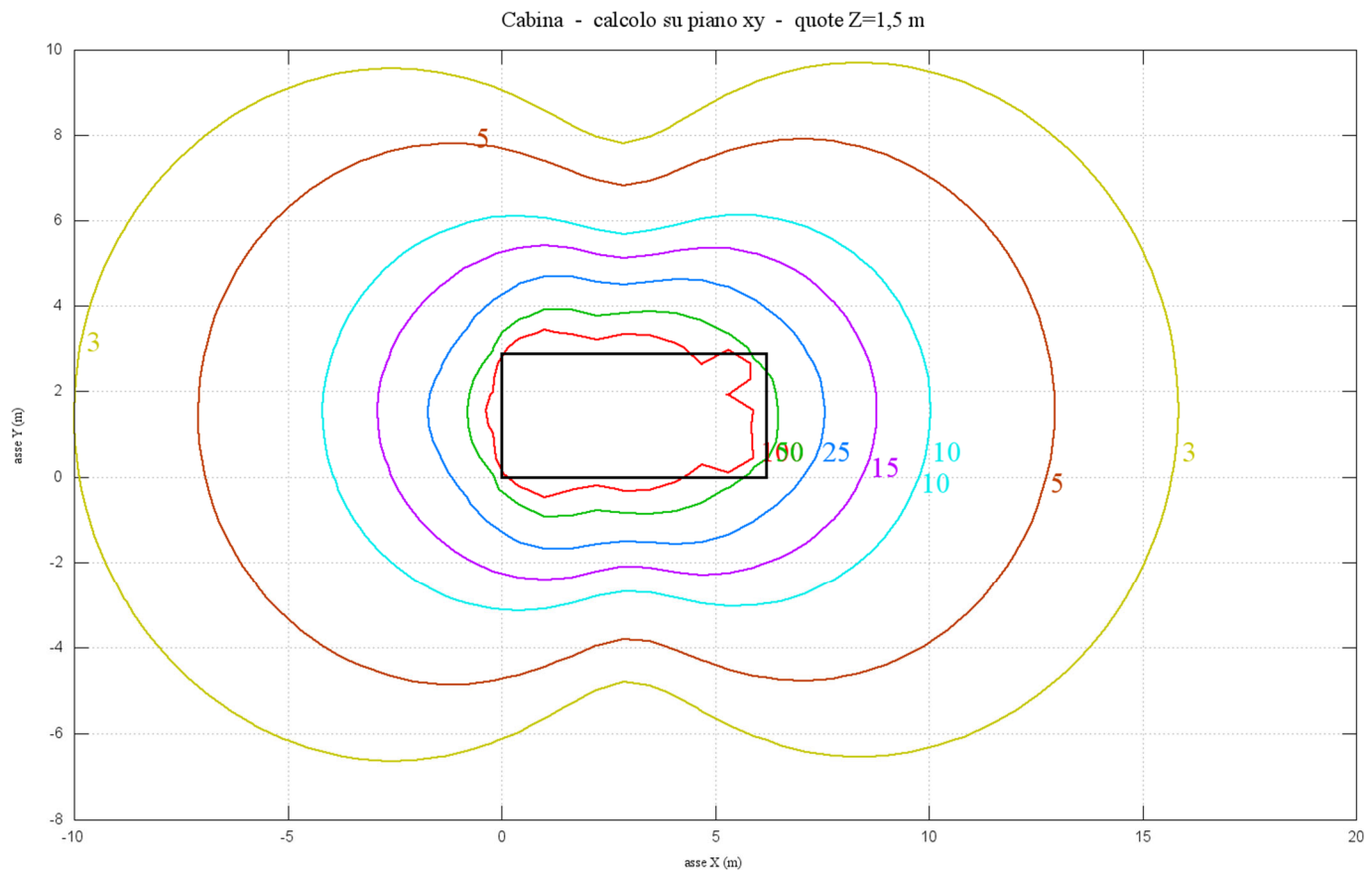


Figura 5.9: curve isolivello del valore di induzione magnetica per stazione energia

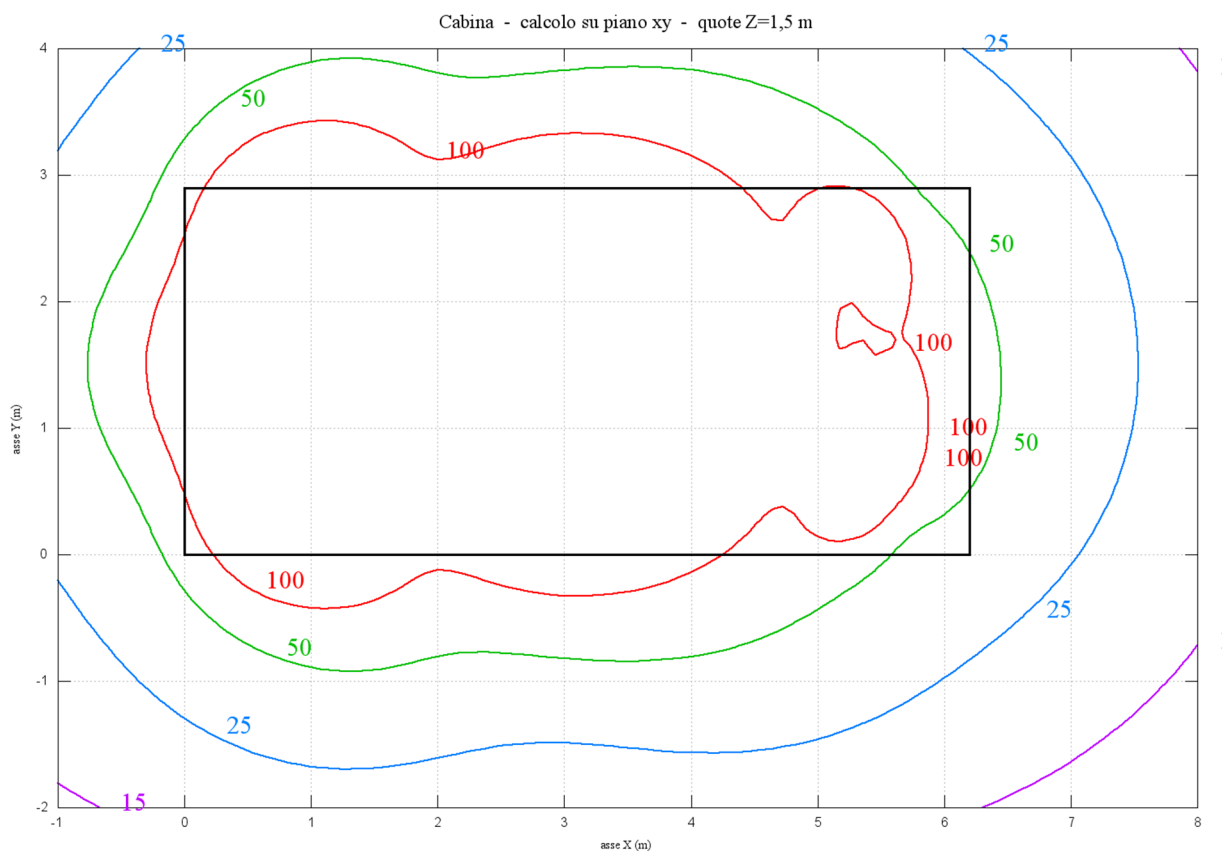


Figura 5.10: curve isolivello del valore di induzione magnetica per stazione energia – Dettaglio

Come si vede dalle precedenti figure il livello di induzione magnetica nell'immediato intorno delle stazioni di energia è superiore a $100\mu\text{T}$.

Tuttavia si fa presente che le stazioni di energia sono interamente contenute nell'area dell'impianto che è recintata ed alla quale accedono solamente i lavoratori che si occupano della conduzione e manutenzione dell'impianto che sono formati ed informati sui rischi relativi all'esposizione ai campi elettromagnetici.

La curva a $10\mu\text{T}$ è comunque all'interno di una distanza di circa 5m dalla struttura.

Le zone a cui può normalmente accedere la popolazione si trovano a distanze tali per cui il livello di induzione magnetica è sicuramente inferiore a $3\mu\text{T}$.

Si ricorda che per i lavoratori, in base a quanto disposto dal DLgs 81/08 all. XXXVI, i valori di attenzione VA inferiori per l'induzione magnetica sono di $1000\mu\text{T}$ (valori RMS).

5.7. Cabina di testa

Sono previste tre cabine di testa per ciascuna delle tre zone in cui è diviso il campo fotovoltaico.

In queste cabine è previsto un quadro MT composto da scomparto arrivo da SST, scomparto misure, n. 2/3 scomparti per linee MT secondarie verso le power station e scomparto ausiliari 400V con trasformatore MT/BT 30/0.4kV di potenza 60kVA in resina.

Le ipotesi di calcolo sono le seguenti:

- Le correnti sul lato 30kV sono state considerate pari a 283A (massimo valore di portata del cavo di sezione 185mm²) per le linee secondarie e 369A per le linee in arrivo da SST (massimo valore di portata del cavo di sezione 300mm²);
- Il trasformatore MT/BT per circuiti ausiliari è isolato in resina e di potenza 160kVA. La corrente sul secondario è fissata a 231A (fattore di carico 100%);
- Non si è considerato l'effetto dei cavi per circuiti ausiliari a 400V perché di piccola potenza e percorsi da correnti di pochi A quindi sostanzialmente trascurabili.

La geometria del modello è rappresentata nelle seguenti figure:

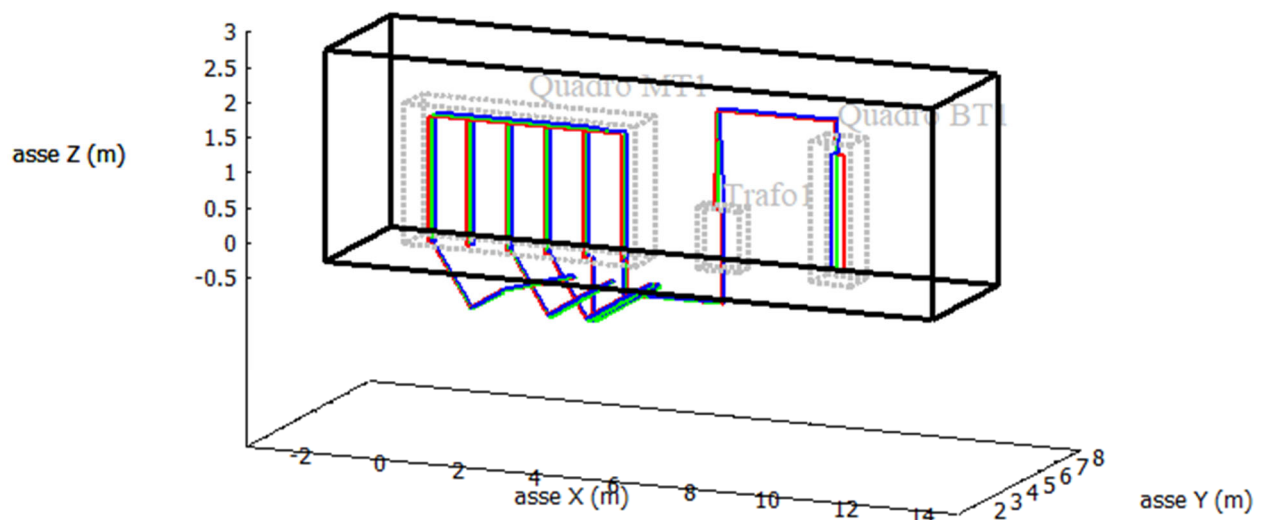


Figura 5.11: modello geometrico per stazione di testa

Sulla base delle ipotesi fatte e del modello come costruito si ricavano i valori di induzione magnetica che, nelle successive figure sono rappresentate sul piano x-y a quota 1.5m dal suolo e a quota 0.

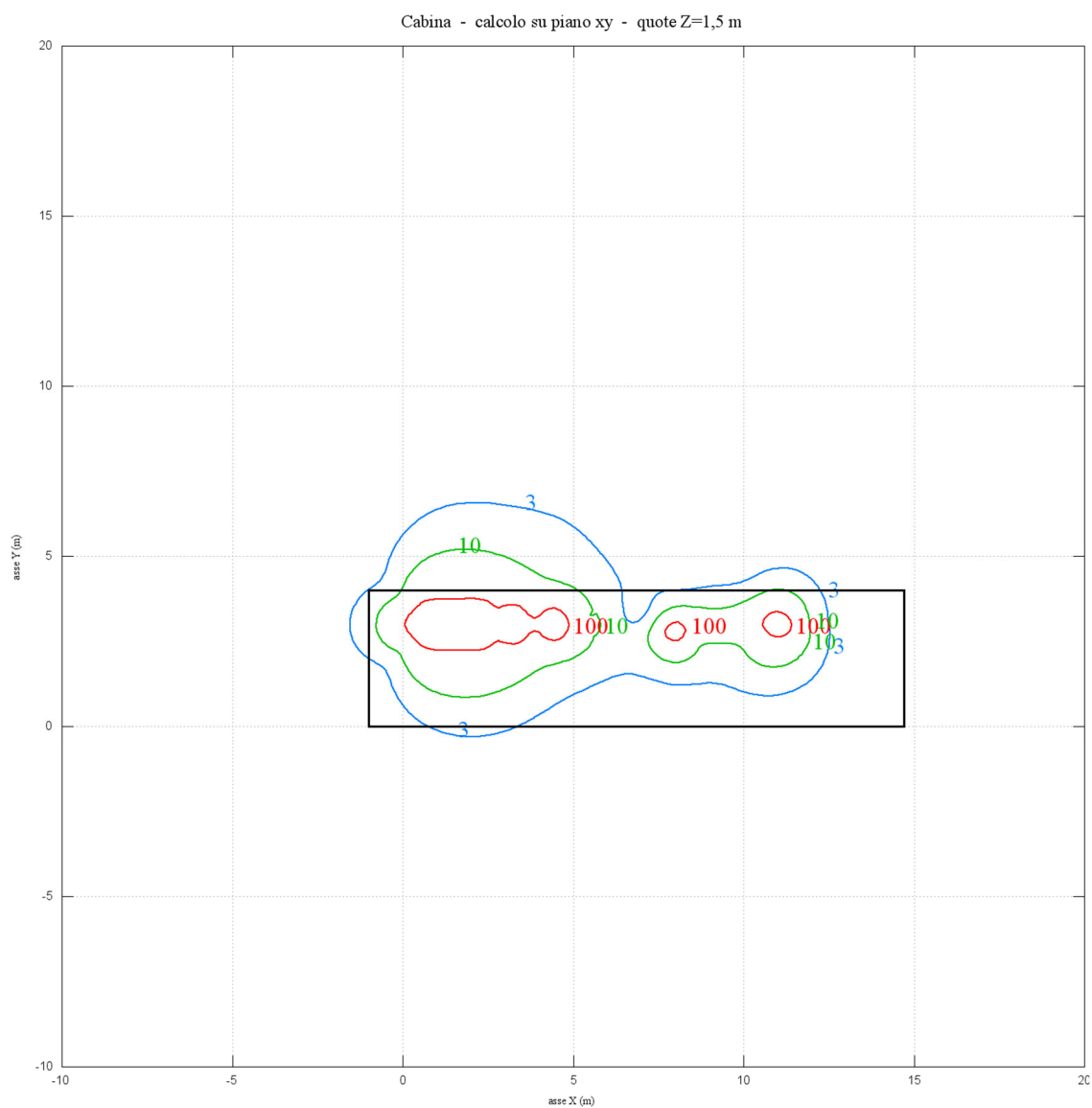


Figura 5.12: curve isolivello del valore di induzione magnetica per cabina di testa – Quota 1.5m

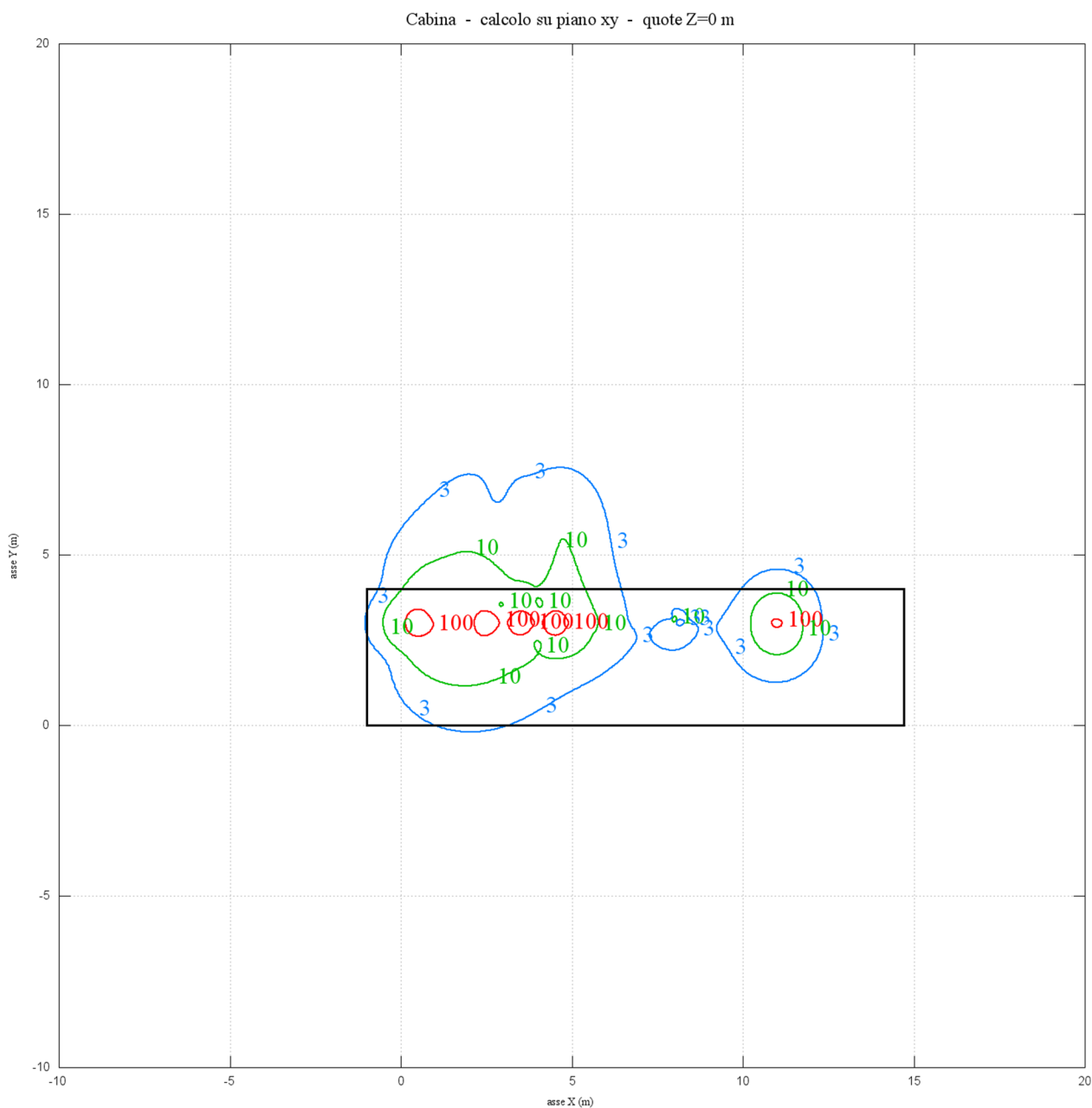


Figura 5.13: curve isolivello del valore di induzione magnetica per cabina di testa – Quota 0m

Come si vede dalle precedenti figure il livello di induzione magnetica a 100 μ T è interamente contenuto nel perimetro della cabina che è zona accessibile solo al personale di manutenzione e gestione dell'impianto.

Le cabine di testa sono comunque interamente contenute nell'area dell'impianto che è recintata ed alla quale accedono solamente i lavoratori che si occupano della conduzione e

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 34
			RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI	

manutenzione dell'impianto che sono formati ed informati sui rischi relativi all'esposizione ai campi elettromagnetici.

La curva a $10\mu\text{T}$ è ad una distanza di meno di 1 m dalla struttura.

Le zone a cui può normalmente accedere la popolazione si trovano a distanze tali per cui il livello di induzione magnetica è sicuramente inferiore a $3\mu\text{T}$.

Si ricorda che per i lavoratori, in base a quanto disposto dal DLgs 81/08 all. XXXVI, i valori di attenzione VA inferiori per l'induzione magnetica sono di $1000\mu\text{T}$ (valori RMS).

5.8. Linea in cavo 380kV da punto di connessione Olmedo a SSTS

La linea in cavo alla tensione di 380kV è realizzata con cavo in estruso e conduttore in rame di sezione 2500mm^2 . Il cavo è posato alla profondità di 1,5m dal piano di campagna con posa con conduttori in piano distanziati di circa 35cm.

Il calcolo è stato effettuato con una corrente di 722A cioè ipotizzando la corrente nominale dei due autotrasformatori di potenza 250MVA.

Per il calcolo si è fatto riferimento ad un tratto rettilineo di linea. Si è poi considerato il calcolo in corrispondenza di una buca giunti tipica. In questo caso il valore dell'induzione magnetica sale per effetto del distanziamento che i cavi devono avere in corrispondenza dei giunti. È tuttavia possibile, nel caso in cui il valore di induzione magnetica sia superiore ai limiti di legge, utilizzare metodi di schermatura basati sul principio di cancellazione delle sorgenti quali loop passivi o schermi passivi.

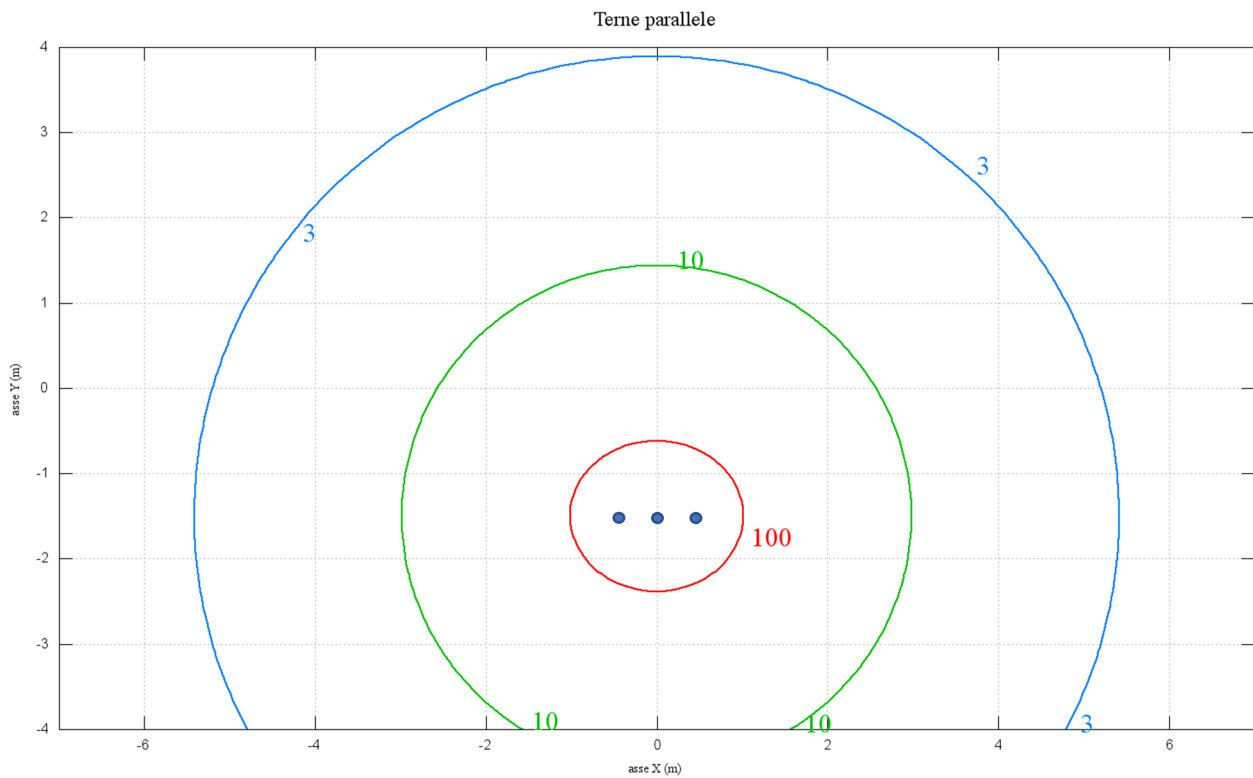


Figura 5.14: curve isolivello induzione magnetica per linea AAT

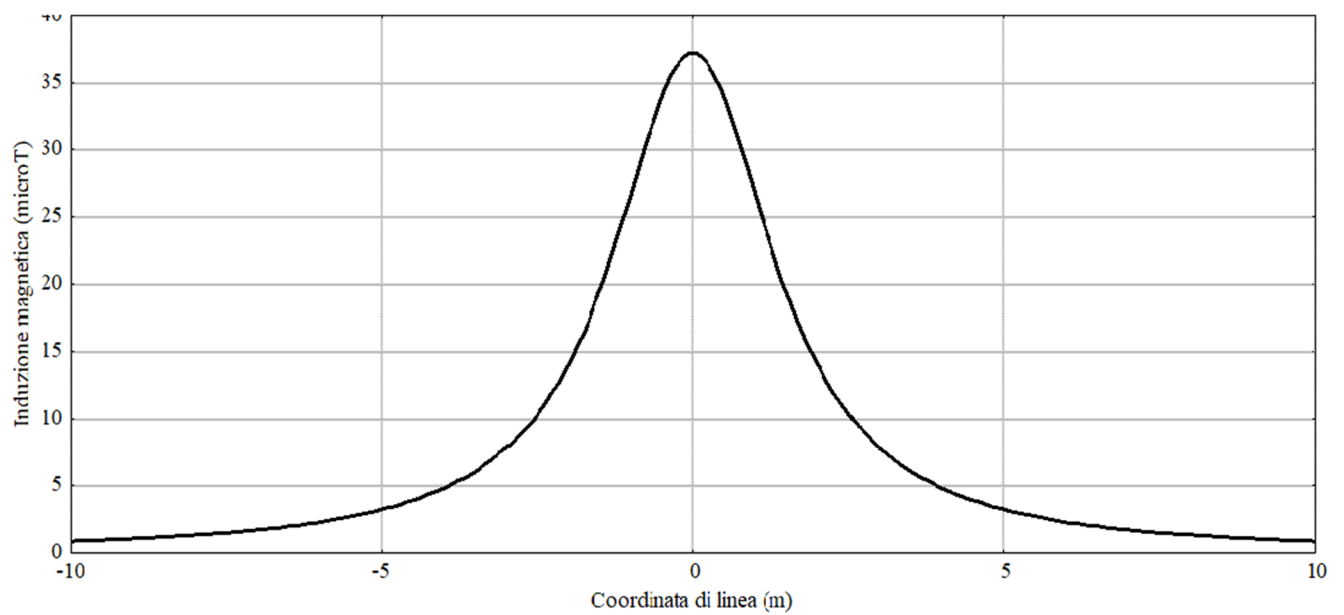


Figura 5.15: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno per linea 380kV

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 36
			RELAZIONE CAMPI Elettromagnetici	

Come si vede dalle curve sopra riportate la curva isolivello a 100 μ T è interamente contenuta nel sottosuolo mentre la DPA è fissata a circa 5,6m per lato.

La linea in questione è interrata su strade pubbliche dove non è prevista la presenza stabile di persone per più di 4 ore al giorno.

Nel seguito si è effettuato il calcolo per una buca giunti tipica del tipo riportato nella sottostante figura

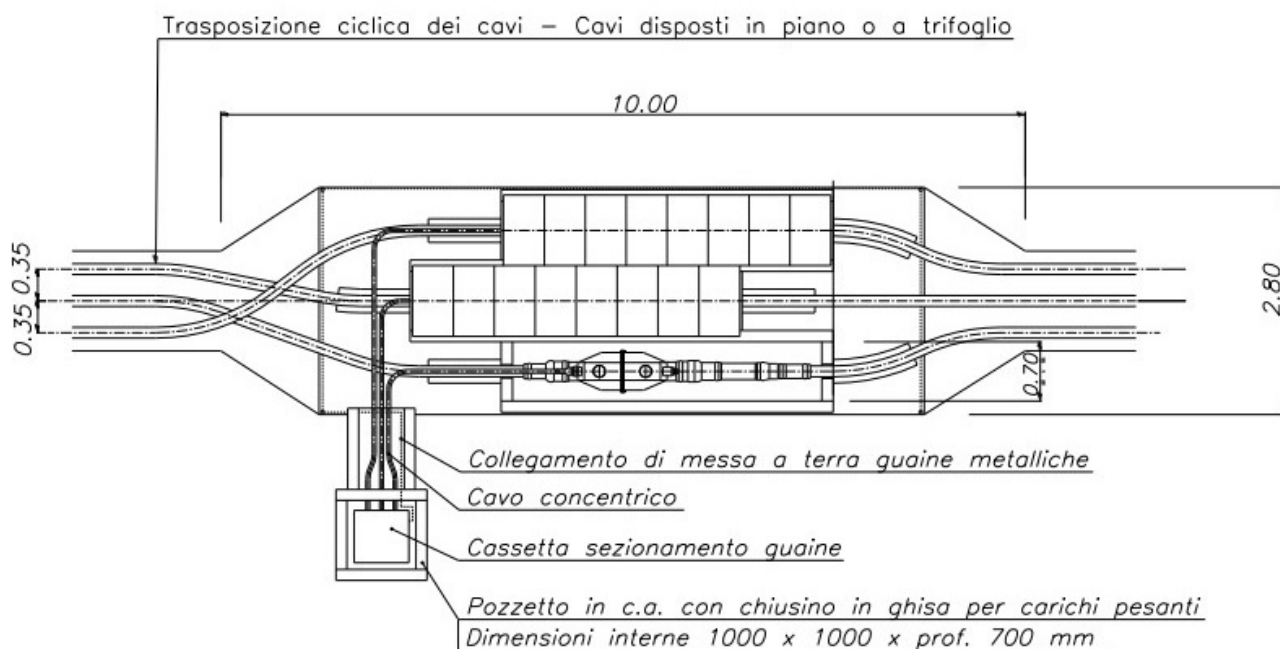


Figura 5.16: tipico di buca giunti

La giunta è contenuta in una camera in cls ad una profondità di 2m dal piano di campagna.

Nel seguito sono riportate le curve isolivello per l'induzione magnetica e l'andamento dell'induzione magnetica a livello del terreno.

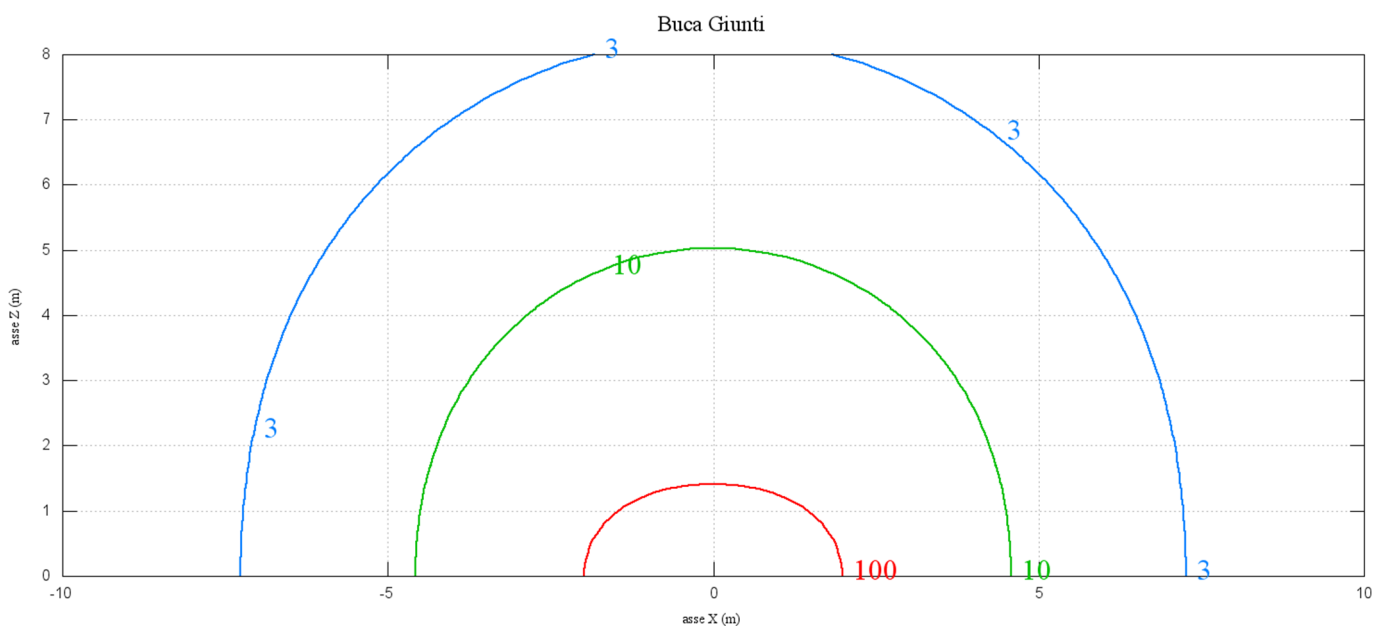


Figura 5.17: curve isolivello induzione magnetica per buca giunti linea AAT (il livello 0 rappresenta il piano di posa del cavo)

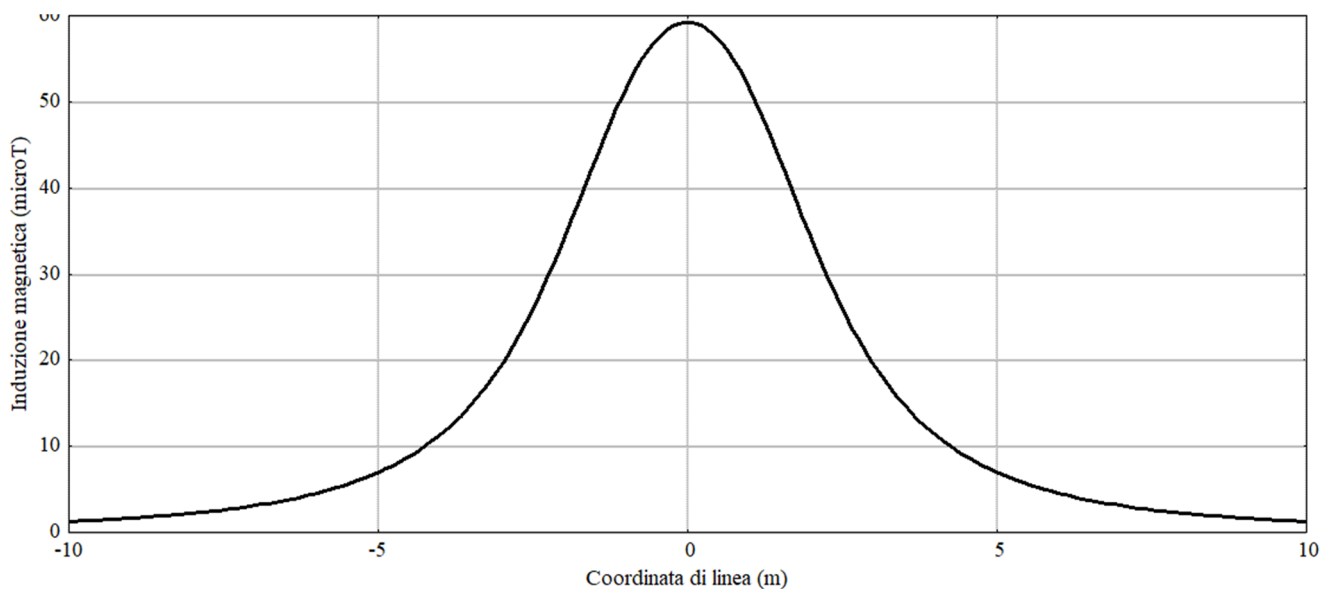


Figura 5.18: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno della buca giunti per linea 380kV

Come si vede dalle curve sopra riportate la curva isolivello a 100 μ T è interamente contenuta nel sottosuolo mentre la DPA è fissata a circa 7.6m per lato.

La linea in questione è interrata su strade pubbliche dove non è prevista la presenza stabile di persone per più di 4 ore al giorno.

Per ridurre il valore di induzione magnetica della buca giunti si potrà eventualmente fare ricorso all'uso di loop passivi in modo da ridurre l'ampiezza della DPA.

5.9. Linea in cavo 150kV da SSTS a SSTN

La linea in cavo alla tensione di 150kV che collega la sottostazione sud con la sottostazione nord è realizzata con cavo in estruso e conduttore in rame di sezione 400mm². Il cavo è posato alla profondità di 1,5m dal piano di campagna con posa con conduttori in piano distanziati di circa 35cm.

Il calcolo è stato effettuato con una corrente di 385A cioè ipotizzando la corrente nominale del trasformatore AT/MT di potenza 100MVA.

Per il calcolo si è fatto riferimento ad un tratto rettilineo di linea. Si è poi considerato il calcolo in corrispondenza di una buca giunti tipica. In questo caso il valore dell'induzione magnetica sale per effetto del distanziamento che i cavi devono avere in corrispondenza dei giunti. È tuttavia possibile, nel caso in cui il valore di induzione magnetica sia superiore ai limiti di legge, utilizzare metodi di schermatura basati sul principio di cancellazione delle sorgenti quali loop passivi o schermi passivi.

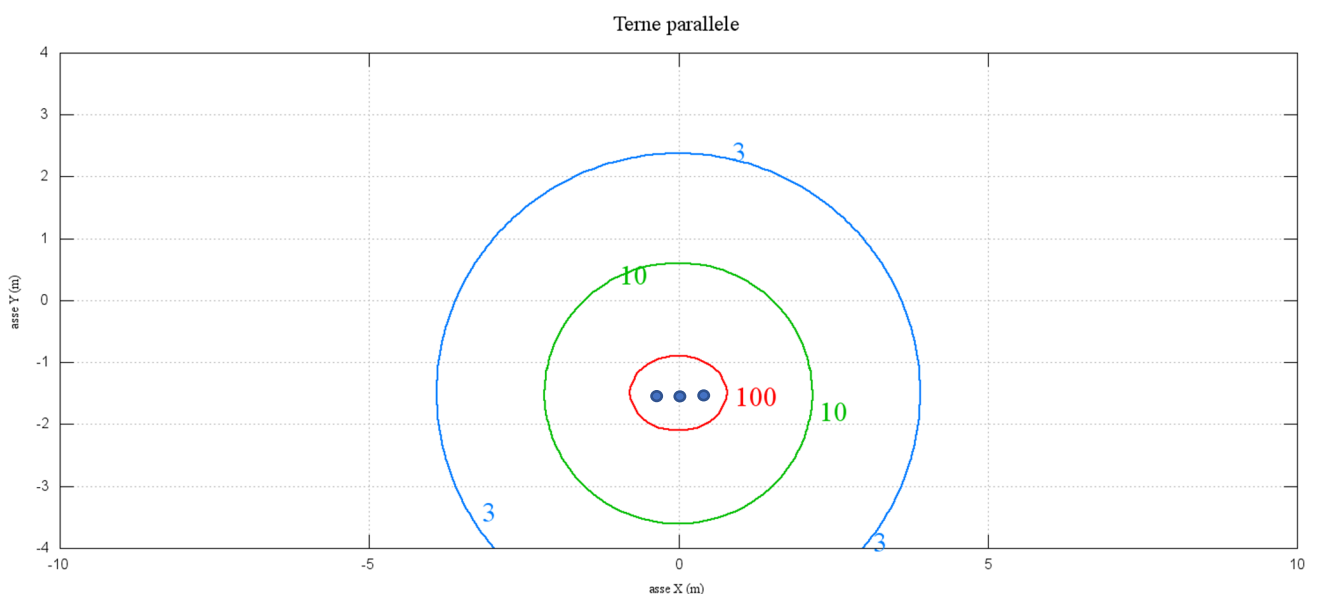


Figura 5.19: curve isolivello induzione magnetica per linea AT

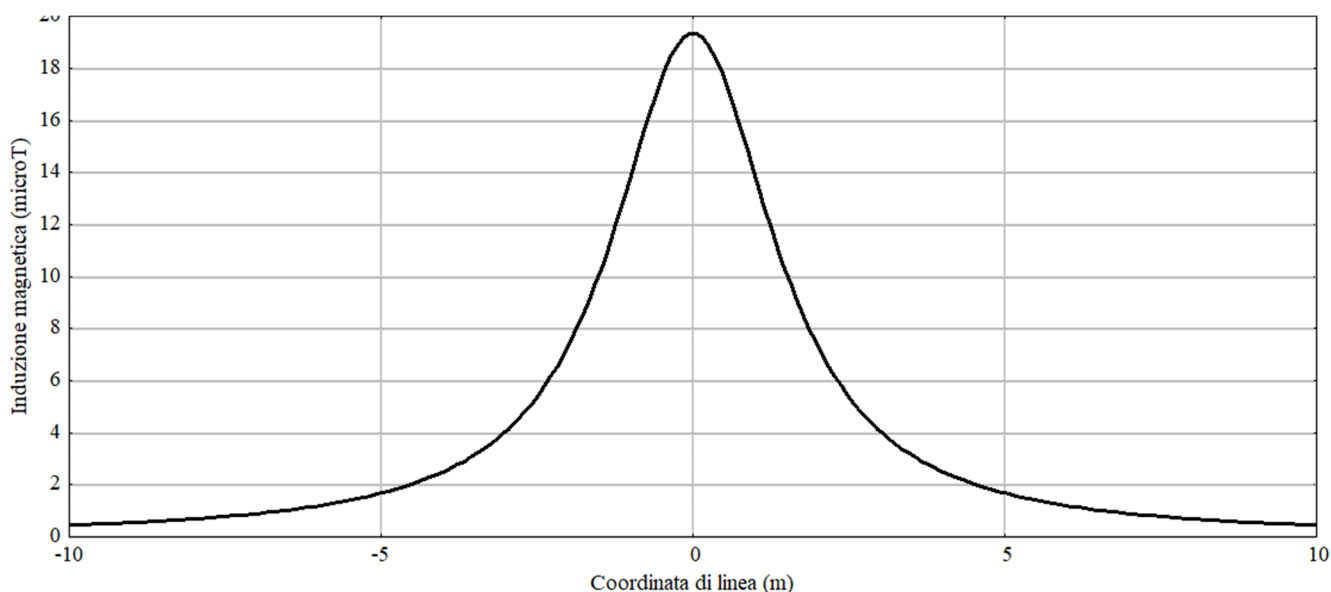


Figura 5.20: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno per linea 150kV

Come si vede dalle curve sopra riportate la curva isolivello a $100\mu\text{T}$ è interamente contenuta nel sottosuolo mentre la DPA è fissata a circa 4m per lato.

La linea in questione è interrata su strade pubbliche dove non è prevista la presenza stabile di persone per più di 4 ore al giorno.

Si è valutato nel seguito il valore di induzione magnetica per la buca giunti a 150kV. Lo schema è quello di Figura 5.16. La distanza tra i cavi in corrispondenza del giunto è fissata a 60cm.

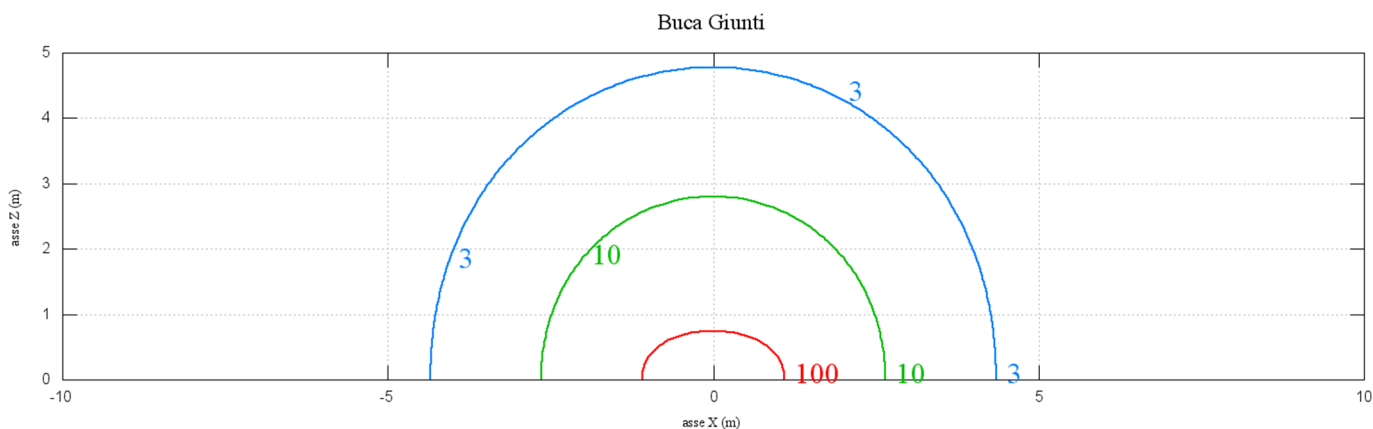


Figura 5.21: curve isolivello induzione magnetica per buca giunti linea AT (il livello 0 rappresenta il piano di posa del cavo)

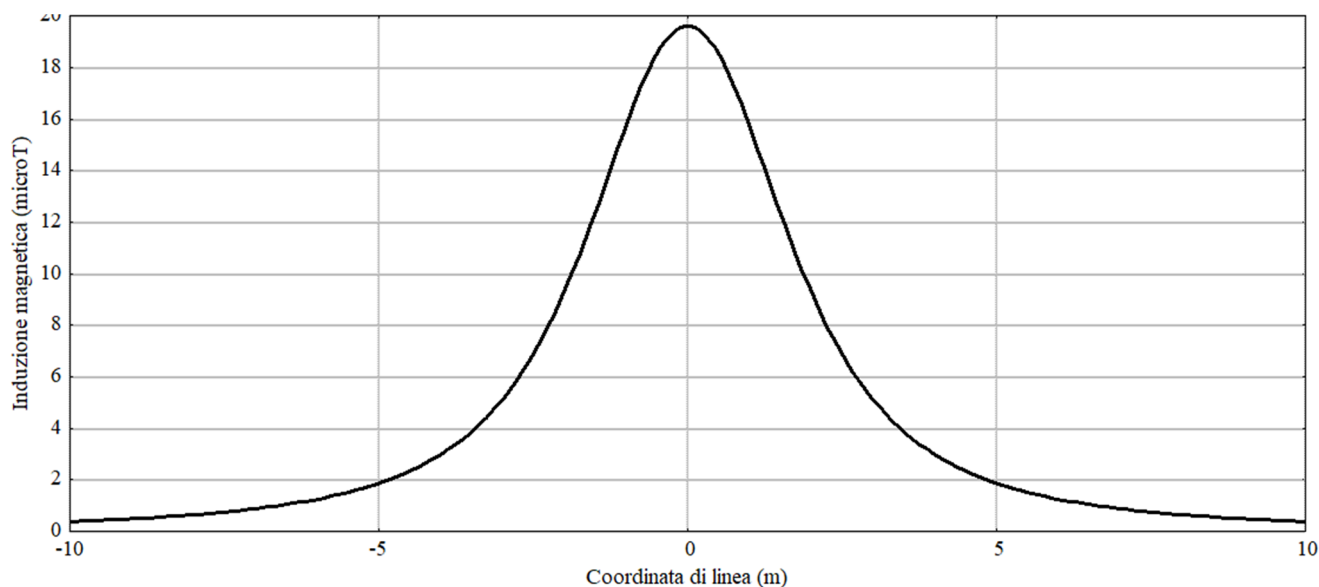


Figura 5.22: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno della buca giunti per linea 380kV

Come si vede dalle curve sopra riportate la curva isolivello a 100 μ T è interamente contenuta nel sottosuolo mentre la DPA è fissata a circa 4.5m per lato.

La linea in questione è interrata su strade pubbliche dove non è prevista la presenza stabile di persone per più di 4 ore al giorno.

Per ridurre il valore di induzione magnetica della buca giunti si potrà eventualmente fare ricorso all'uso di loop passivi in modo da ridurre l'ampiezza della DPA.

5.10. Sottostazione sud

La sottostazione sud (SSTS) riceve la tensione a 380kV mediante la linea di connessione dalla stazione di Olmedo.

Essa è in sintesi composta da tre sezioni:

- Sezione ricezione a 380kV, sbarre a 380kV e trasformazione 400/150kV a mezzo di due autotrasformatori di potenza 250MVA ciascuno;

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 41
			RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI	

- Sbarre 150kV e sezione trasformazione 150/30kVA mezzo di tre trasformatori di potenza 100MVA ciascuno;
- Sezione distribuzione 30kV realizzata con tre quadri MT (uno per ciascun trasformatore).

I calcoli dell'induzione magnetica sono stati effettuati modellando la geometria dei conduttori, i trasformatori ed i quadri MT con i seguenti valori di corrente che rappresentano le correnti nominali dei trasformatori:

- Rete a 380kV in arrivo da Olmedo: 722A;
- Rete a 380kV per ciascun autotrasformatore: 361A;
- Rete a 150kV: 1926A (massima corrente in uscita dai due autotrasformatori);
- Primario trasformatori 150/30kV: 385A;
- Secondario trasformatori 150/30kV: 1926A.

La valutazione dell'induzione magnetica per la cabina MT di distribuzione è stata realizzata per una cabina campione (le tre cabine sono sostanzialmente identiche) tenendo conto delle linee MT in partenza.

Nel seguito si riportano i valori calcolati per le tre sezioni di impianto:

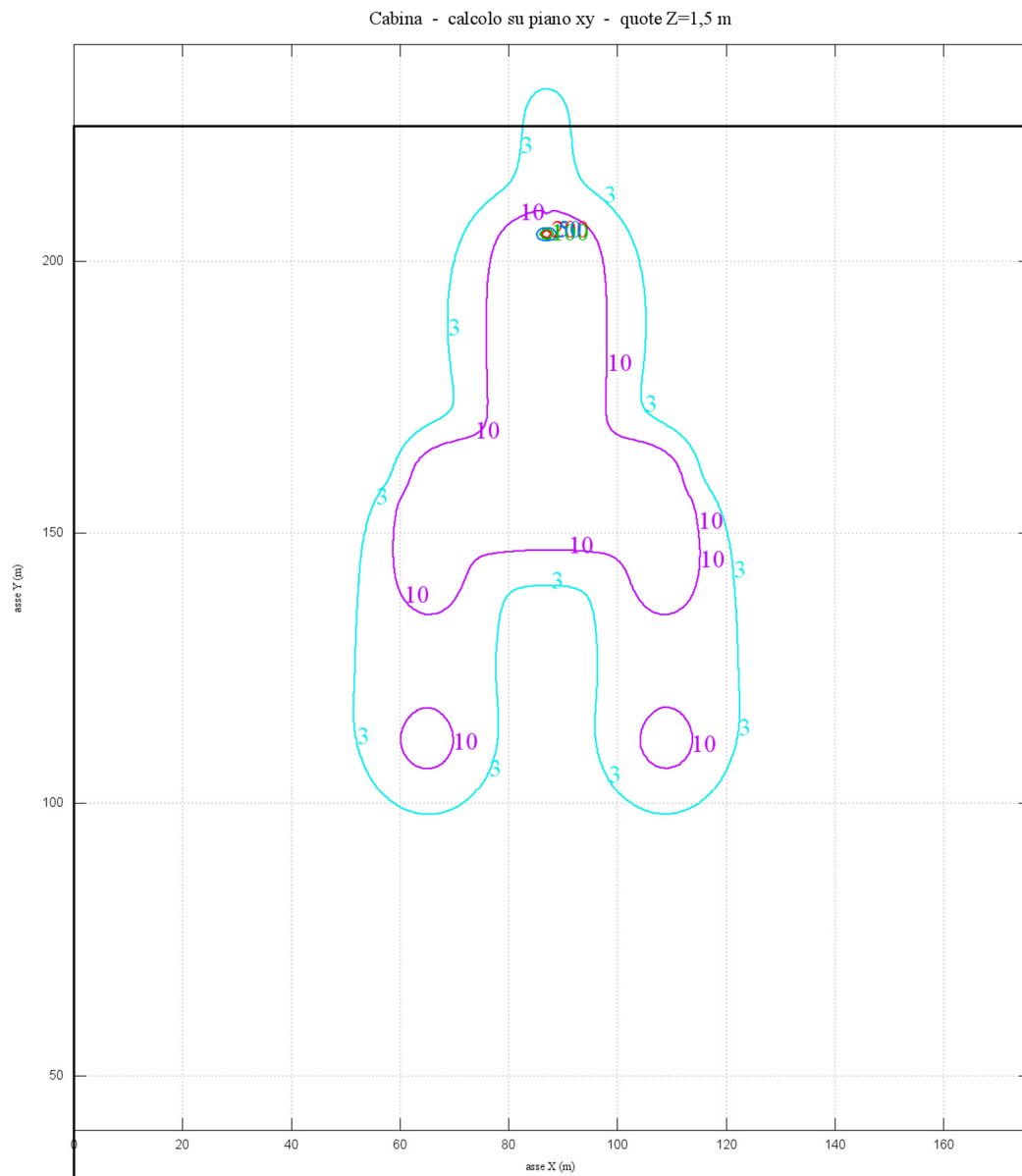


Figura 5.23: curve isolivello sezione 380kV quota 1.5m da piano campagna (il contorno rappresenta la recinzione della stazione)

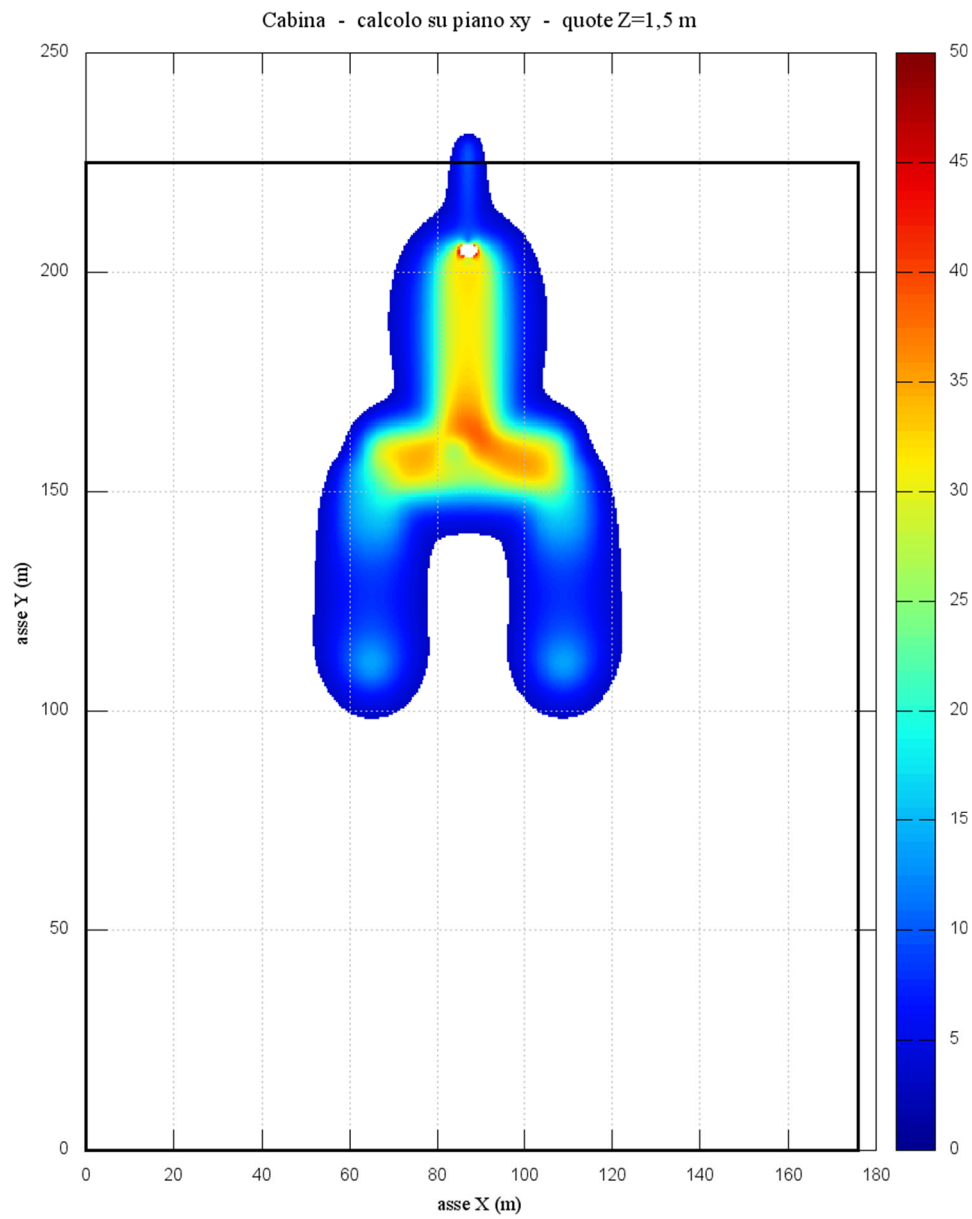
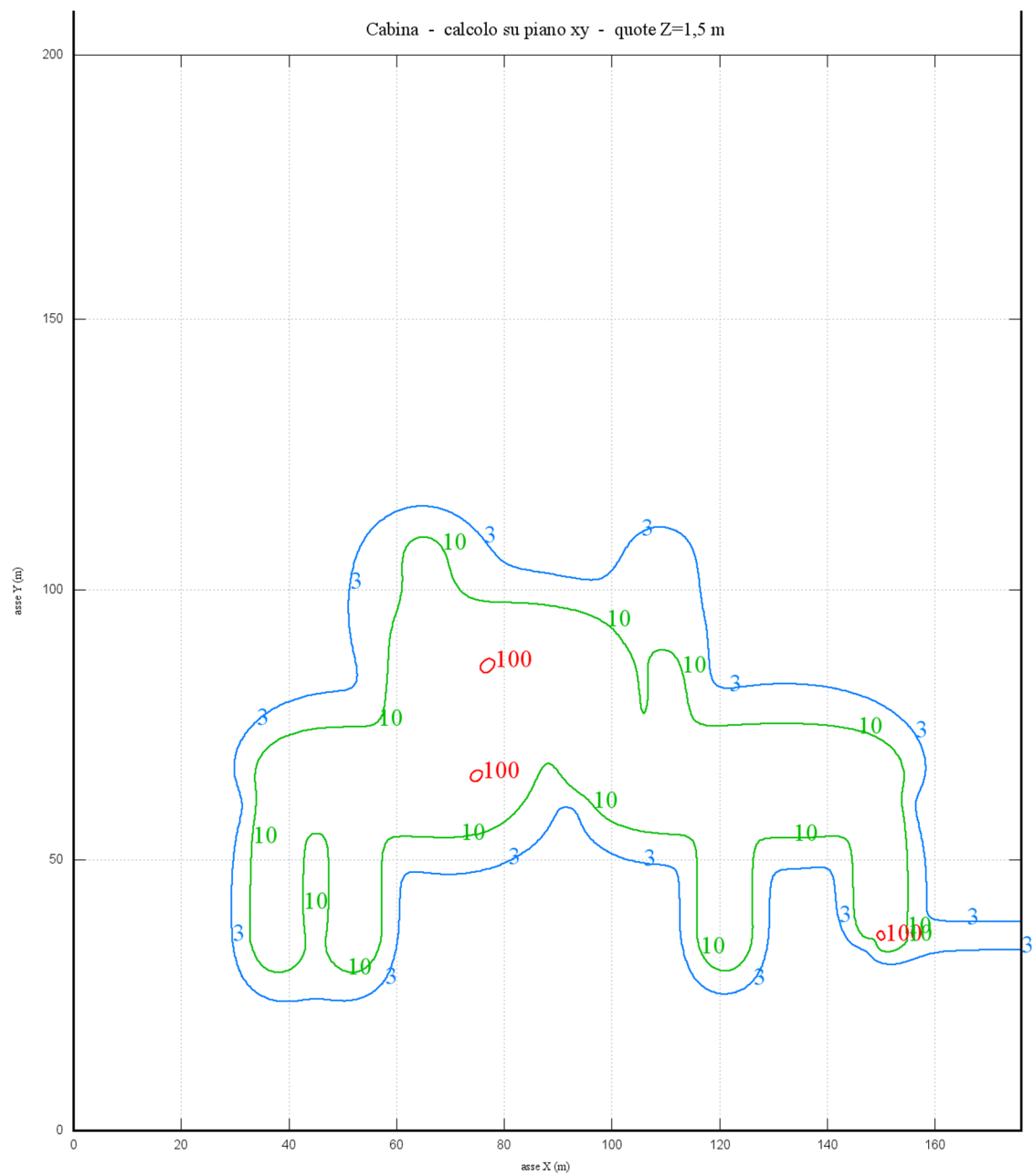


Figura 5.24: rappresentazione valori induzione per sezione 380kV



**Figura 5.25: : curve isolivello sezione 150kV quota 1.5m da piano campagna (il contorno rappresenta la recin-
zione della stazione)**

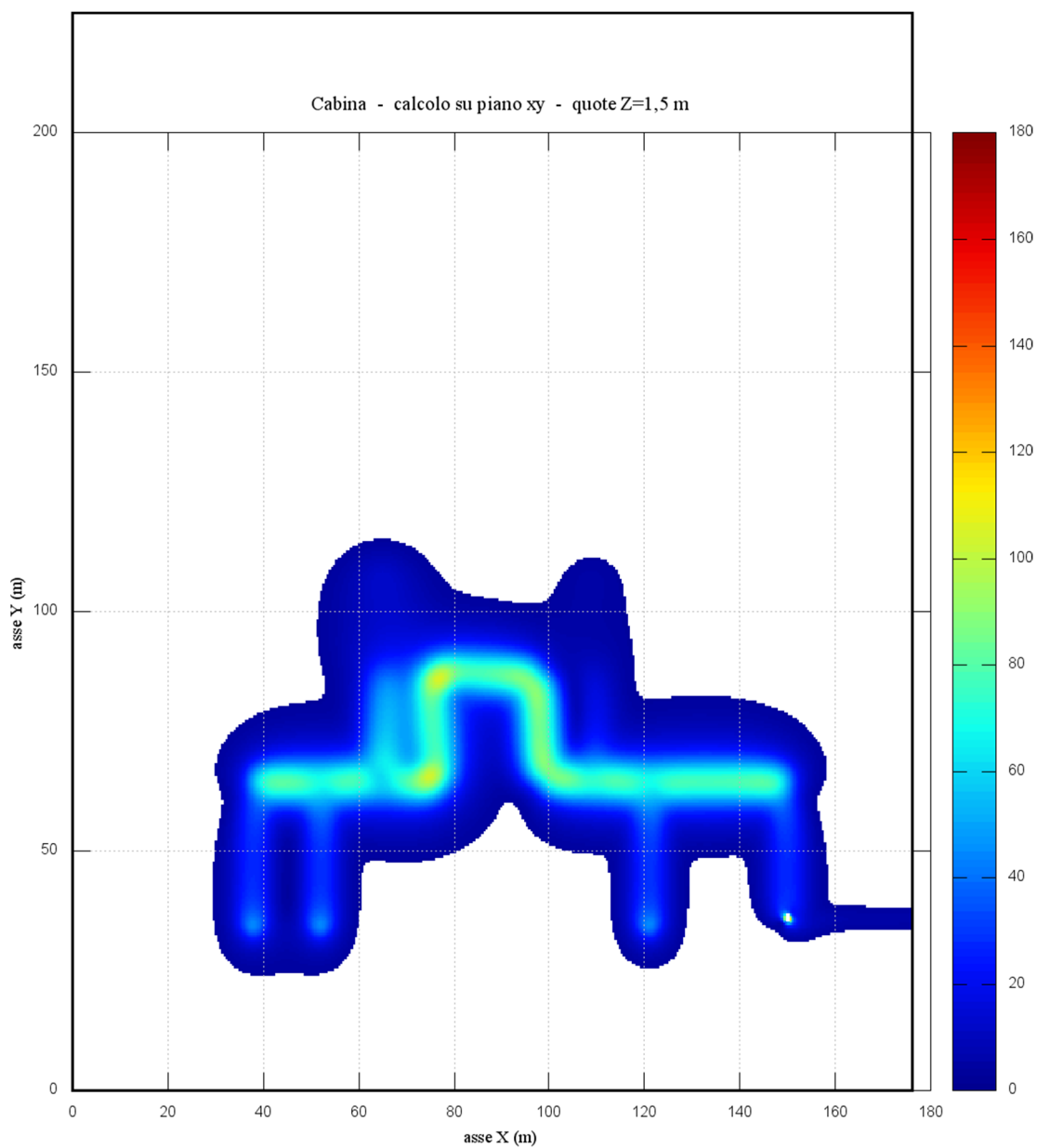


Figura 5.26: rappresentazione valori induzione per sezione 150kV

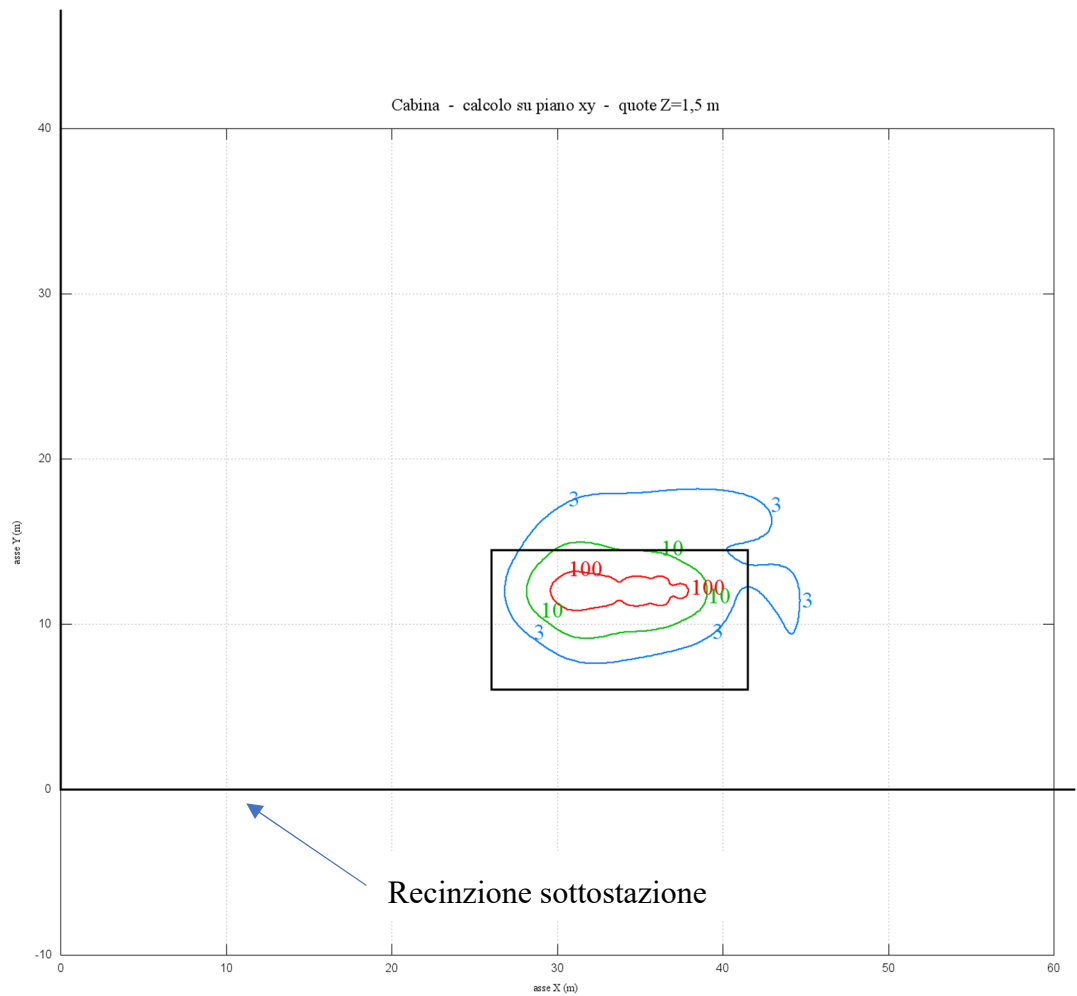


Figura 5.27: curve iso induzione per cabina MT di sottostazione, quota 1.5m da piano di campagna

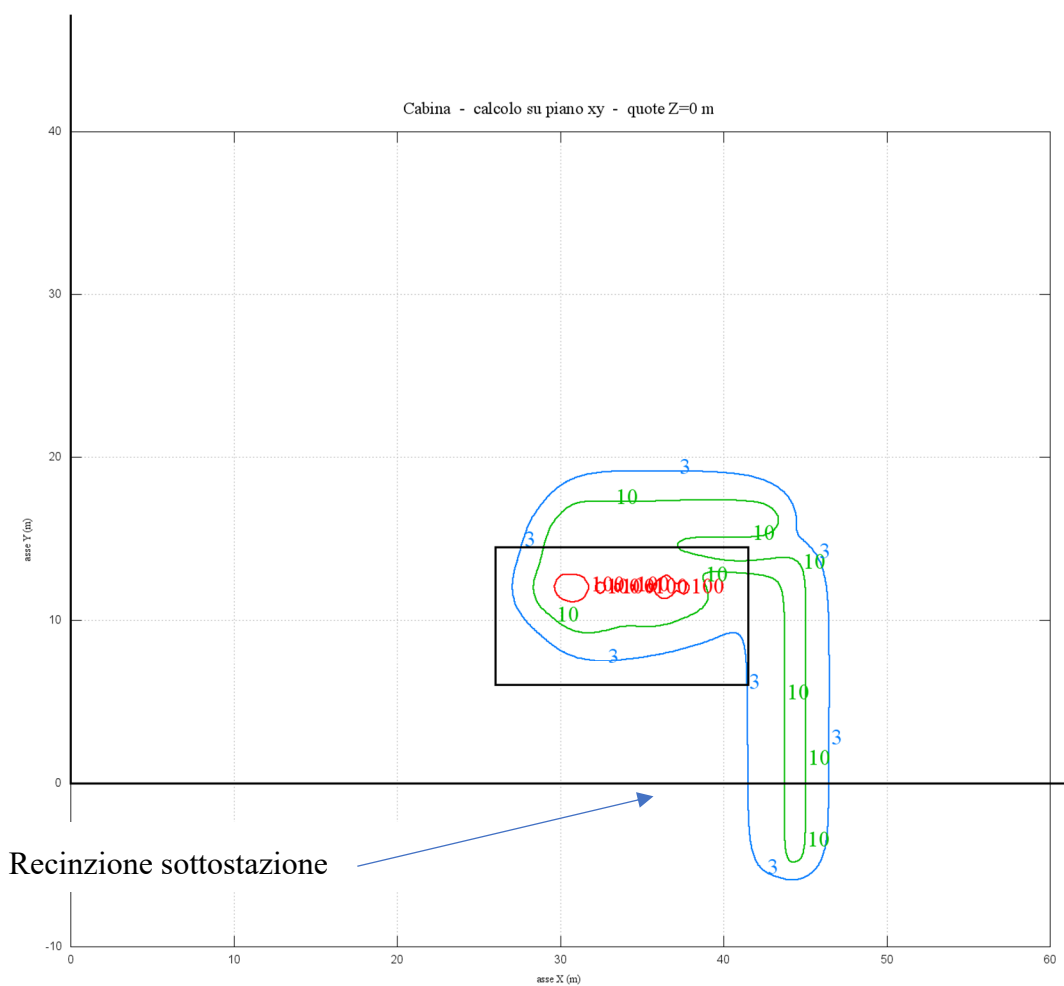


Figura 5.28: curve iso induzione per cabina MT di sottostazione, quota 0m da piano di campagna

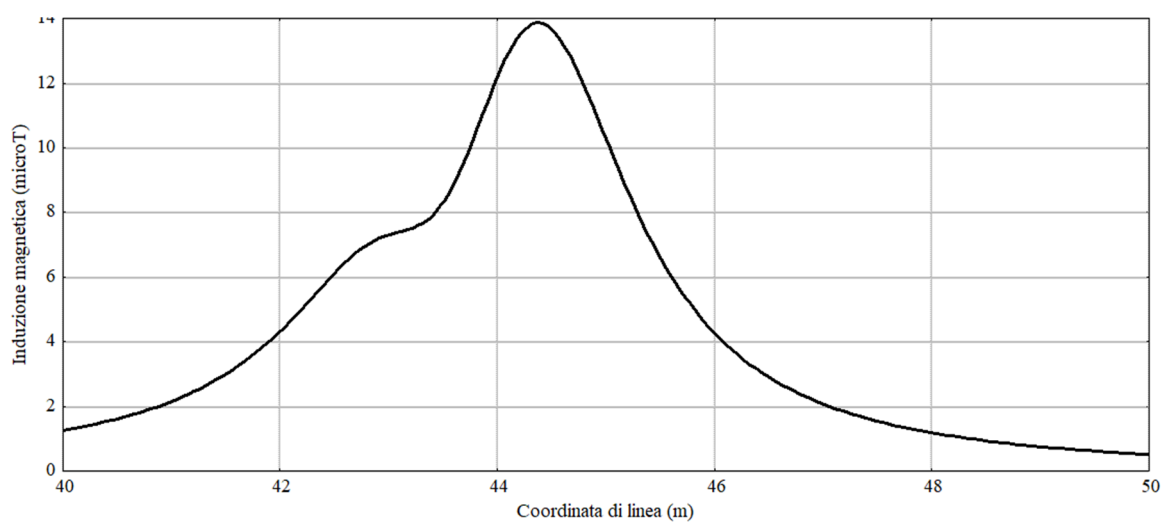


Figura 5.29: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno per linee MT in uscita da SSTS

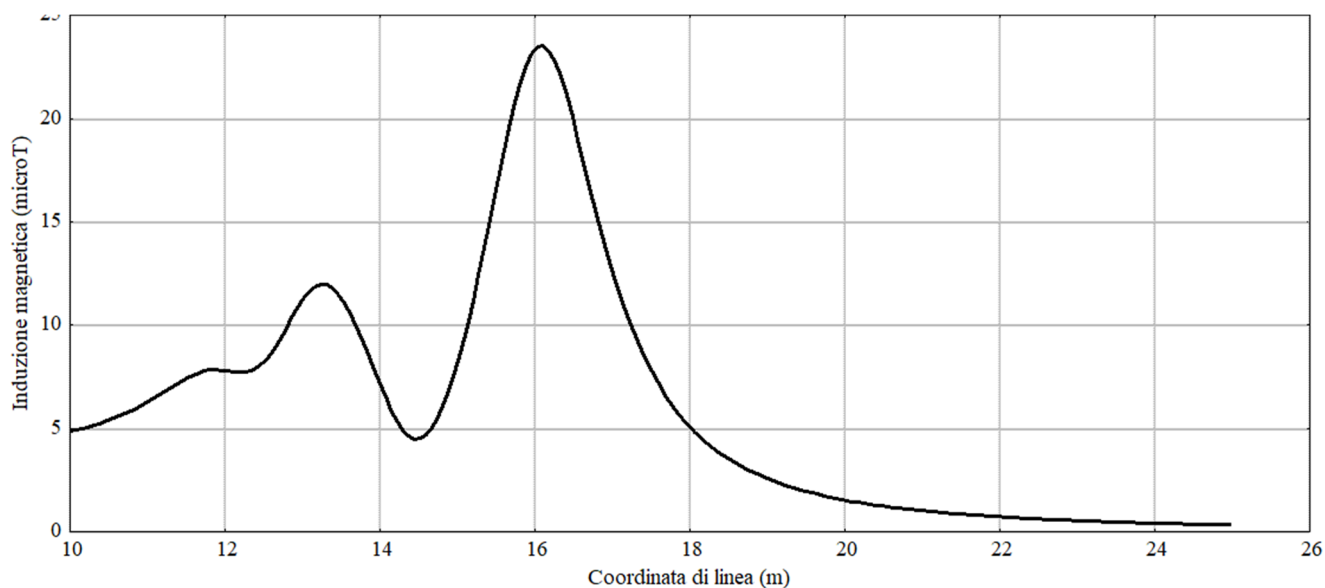


Figura 5.30: andamento del valore di induzione magnetica a livello del terreno per linee MT in uscita da trasformatore AT/MT

Come si vede dai grafici riportati, il calcolo ha evidenziato che il limite dei $3\mu\text{T}$ è interamente contenuto all'interno del perimetro della sottostazione che è zona con accesso riservato solo agli operatori.

Valori elevati di induzione magnetica si raggiungono solo in corrispondenza dei conduttori, dei trasformatori, dei dispositivi di manovra e dei quadri elettrici che comunque non sono accessibili durante il normale funzionamento dell'impianto.

5.11. Sottostazione nord

La sottostazione nord (SSTN) riceve la tensione a 150kV dalla sottostazione sud ed effettua la trasformazione a 30kV tramite trasformatore con isolamento in olio di potenza 100MVA.

Il calcolo è stato effettuato alla corrente nominale della macchina (385A lato primario).

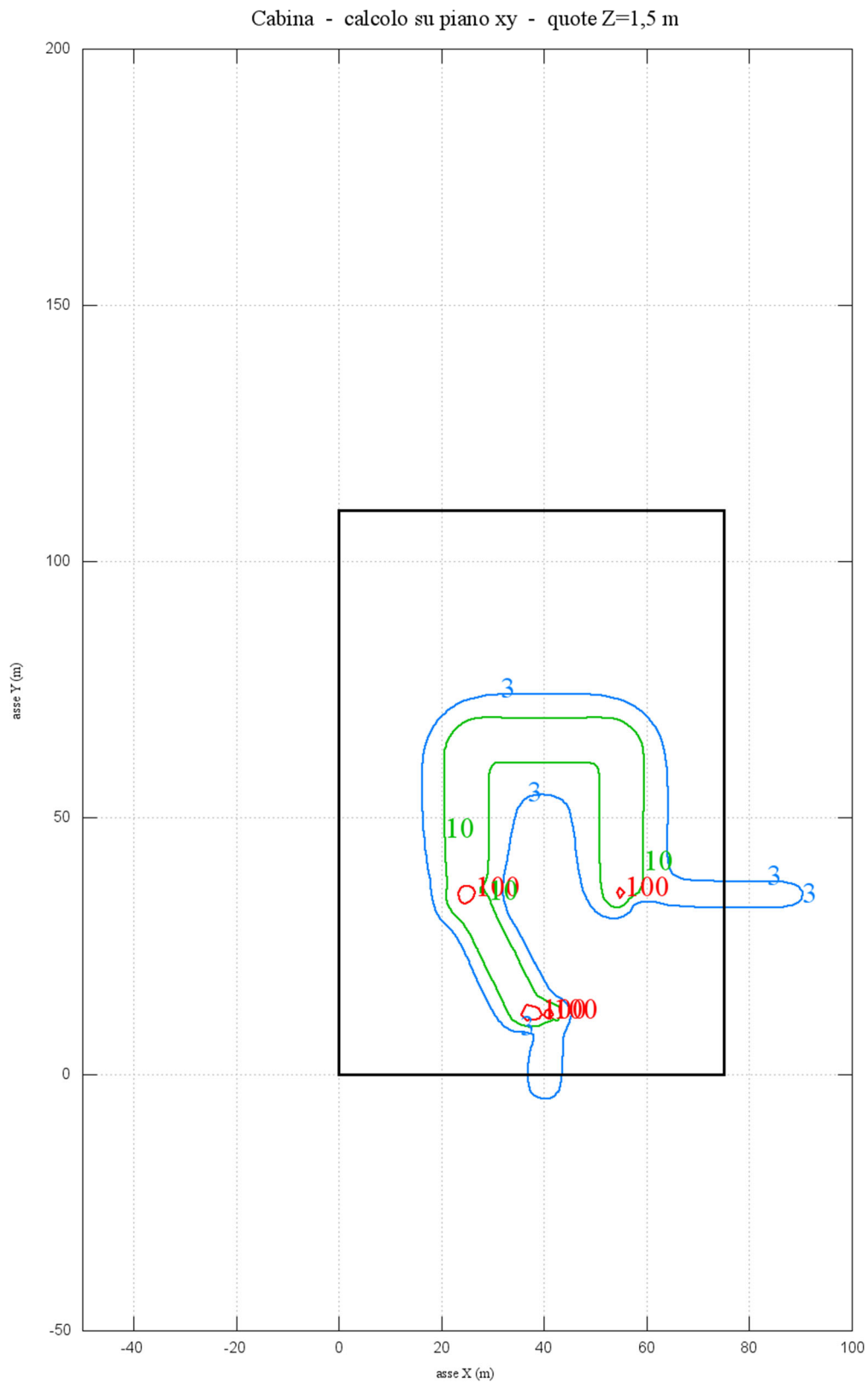


Figura 5.31: curve iso induzione magnetica per la SSTN (Il contorno in grassetto rappresenta la recinzione della stazione)

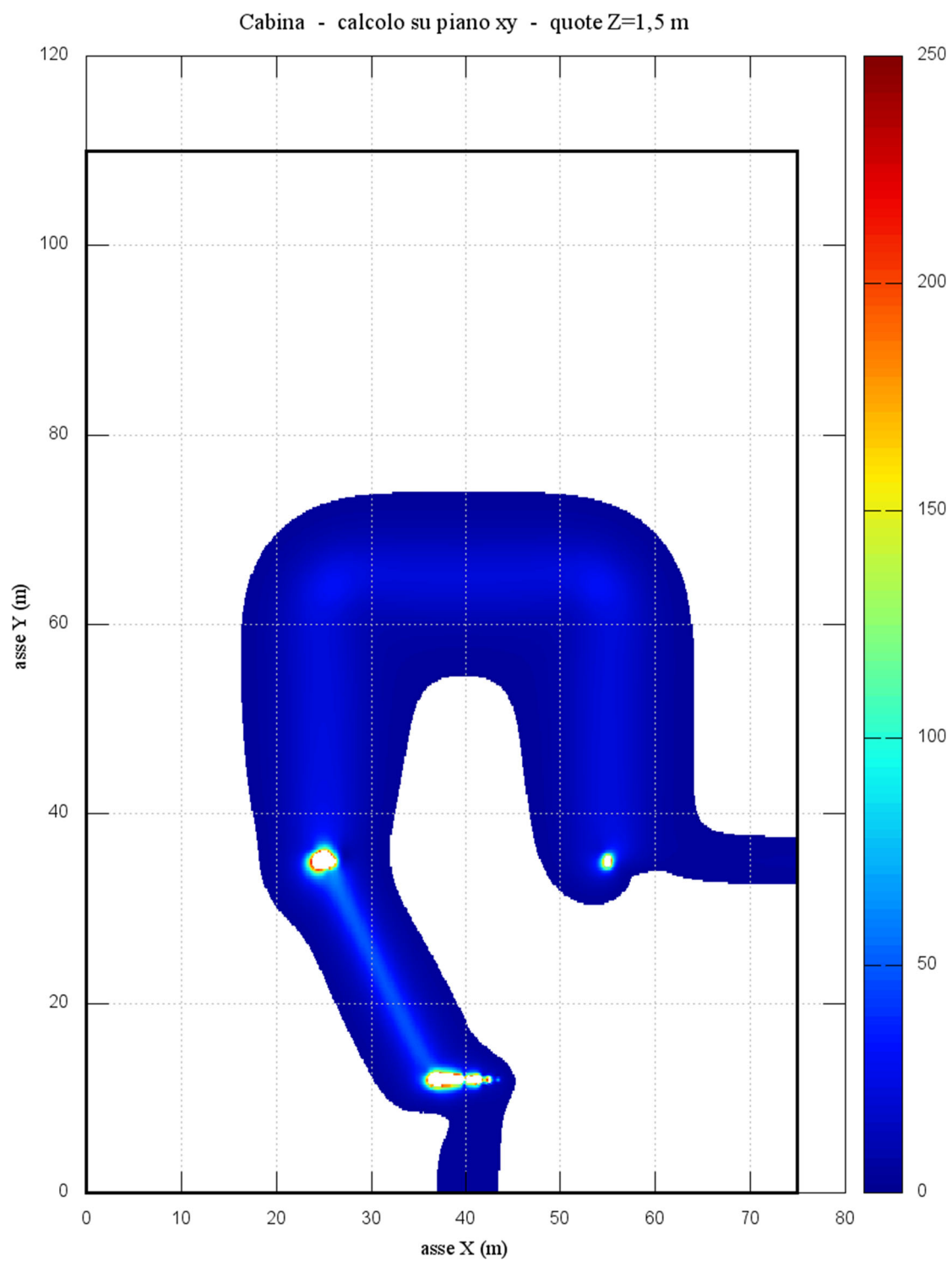


Figura 5.32: mappa 2D induzione magnetica SSTN

Cabina - calcolo su piano xy - quote Z=1,5 m

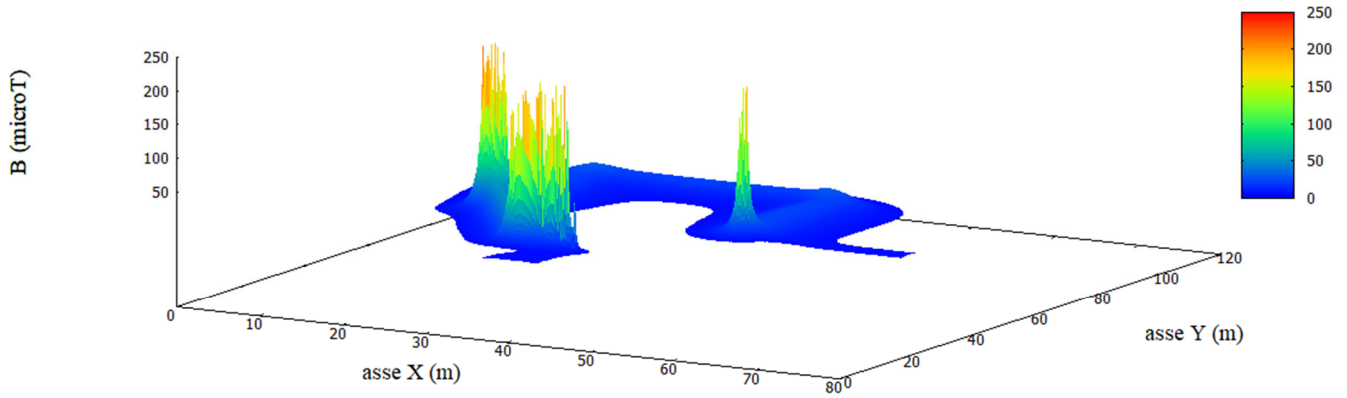


Figura 5.33: mappa 3D induzione magnetica SSTN

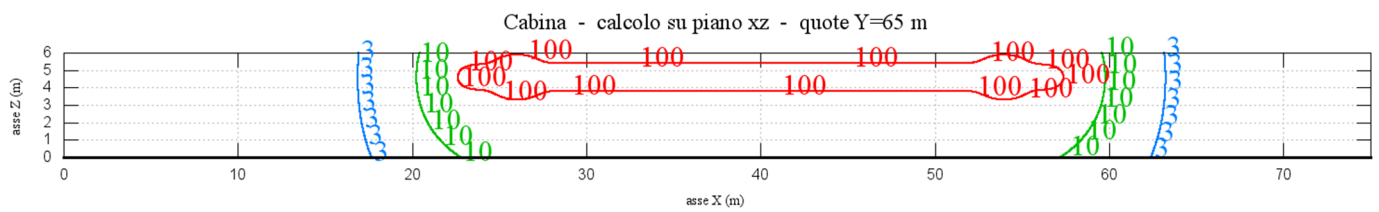


Figura 5.34: curve iso induzione magnetica sul piano XZ in corrispondenza dei conduttori AT

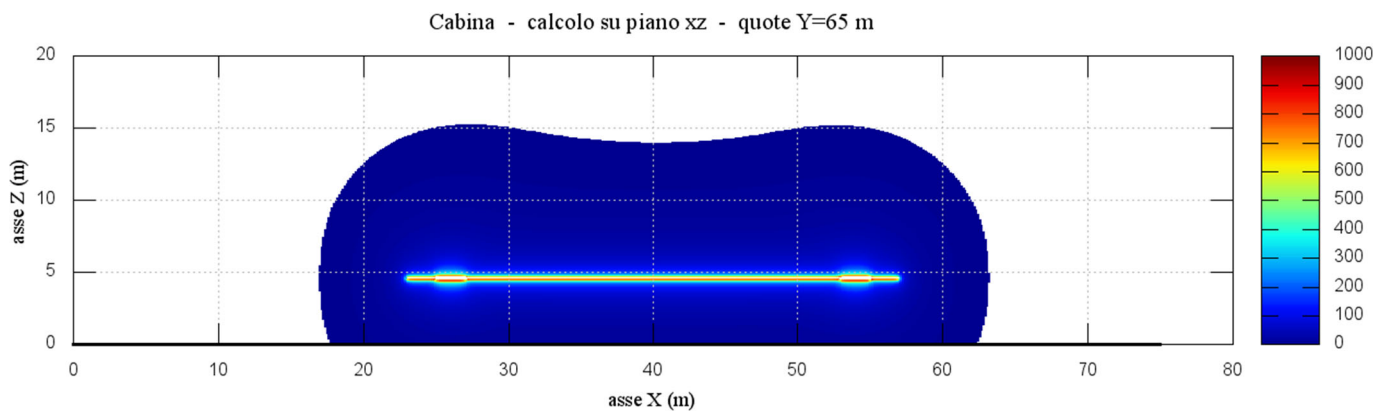


Figura 5.35: mappa 2D induzione magnetica sul piano XZ

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 52
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	

Come si vede dai grafici riportati, il calcolo ha evidenziato che il limite dei 3 μ T è interamente contenuto all'interno del perimetro della sottostazione che è zona con accesso riservato solo agli operatori.

Valori elevati di induzione magnetica si raggiungono solo in corrispondenza dei conduttori, dei trasformatori, dei dispositivi di manovra e dei quadri elettrici che comunque non sono accessibili durante il normale funzionamento dell'impianto.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BIO28F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 53
			RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI	

6. CONCLUSIONI

Le apparecchiature e gli impianti del campo fotovoltaico producono campi elettrici e magnetici a bassa frequenza (50 Hz), prodotti rispettivamente dalla tensione di esercizio degli elettrodotti/apparecchiature e dalla corrente che li percorre.

Per quanto esposto nei capitoli precedenti si riassumono le conclusioni:

- Il campo elettrico in AAT ed AT raggiunge valori elevati e superiori ai 5kV/m solo nell'immediata vicinanza delle sbarre.
- Il campo elettrico in media tensione è sicuramente inferiore a 5 kV/m (valore imposto dalla normativa per la popolazione);
- Il campo elettrico determinato dai cavi interrati è pressoché nullo già nelle immediate vicinanze dei cavidotti interrati per via degli schermi e delle protezioni;
- L' induzione magnetica calcolata nelle condizioni peggiori possibili, presenta una fascia di rispetto che non insiste su aree occupate stabilmente dalla popolazione ma solo all'interno dell'area dell'impianto o lungo strade comunali/provinciali. Dall'analisi risulta che non ci siano zone occupate stabilmente dalla popolazione per più di 4 ore/giorno nelle quali l'induzione magnetica è maggiore di $3\mu\text{T}$. Valori più alti ma comunque sempre largamente inferiori al valore limite per la popolazione fissato in $100\mu\text{T}$ si possono raggiungere in zone dove non è prevista la presenza continuativa di persone durante la giornata.
- Per i cavi AAT alla tensione di 380kV posati lungo strade pubbliche e su terreni al di fuori dell'area del campo fotovoltaico si definisce una DPA pari a circa 5.6m. Per le buche giunti la DPA è valutata in 7.6m. In tali zone non risultano siano ricomprese aree dove è prevista la presenza di persone per più di 4 ore al giorno;
- Per i cavi AT alla tensione di 150kV posati lungo strade pubbliche e su terreni al di fuori dell'area del campo fotovoltaico si definisce una DPA pari a circa 4m. Per le buche giunti la DPA è valutata in 4.5m. In tali zone non risultano siano ricomprese aree dove è prevista la presenza di persone per più di 4 ore al giorno;
- Per i cavi MT posati lungo strade pubbliche e su terreni al di fuori dell'area del campo fotovoltaico si definisce una DPA pari a circa 3m. In tali zone non risultano siano ricomprese aree dove è prevista la presenza di persone per più di 4 ore al giorno;
- Le cabine MT/BT presentano valori in alcuni casi superiori al valore di $100\mu\text{T}$ ma solo nelle loro immediate vicinanze (vedere Figura 5.9 e Figura 5.12) quindi in riferimento al

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 54
			RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI	

DPCM 8 luglio 2003 e al DM del 29.05.2008, l'obiettivo di qualità si raggiunge, nel caso peggiore (power station 9000kVA), a circa 10 m dalle cabine. Queste saranno comunque installate all'interno delle aree del campo fotovoltaico che sono recintate ed accessibili solamente al personale addetto alla conduzione e manutenzione dell'impianto. Per questi ultimi si applicano i limiti stabiliti dal DLgs 81/08 allegato XXXVI per i lavoratori (pari a 1000 μ T intesi come valori di azione inferiori);

- Le apparecchiature installate saranno tutte singolarmente provviste di certificazione EMC e conseguente marchio CE, oltre che piazzate all'interno delle aree dell'impianto e nelle stesse condizioni delle cabine.

Per quanto calcolato si è dunque dimostrato come non ci siano fattori di rischio per la salute umana a causa degli impianti in progetto, poiché è esclusa la presenza di recettori sensibili entro le fasce per le quali i valori di induzione magnetica attesa non sono inferiori agli obiettivi di qualità fissati per legge. Nelle zone all'interno delle aree occupate dall'impianto si applicano le disposizioni riguardanti l'esposizione dei lavoratori ed anche in questo caso i valori calcolati sono minori dei limiti stabiliti dalla Legge.

Pertanto, si può senz'altro affermare che sia verificata una condizione di tutela sia della popolazione nelle aree esterne (DPCM 08/07/2003), sia dei lavoratori in aree interne (DLgs 159/2016).

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 55
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	

7. ALLEGATO A: DESCRIZIONE ALGORITMO DI CALCOLO



Benvenuti in MAGIC vs 1.0

La necessità della valutazione della DPA (distanza di prima approssimazione) secondo quanto richiesto dal decreto 29/05/2008, in cui è stata approvata la metodologia di calcolo per la procedura di misura e valutazione dell'induzione magnetica generata da elettrodotti nel rispetto dei principi della Legge Quadro 36/01 e del D.P.C.M. 8 luglio 2003, richiede spesso di tenere conto della complessità della sorgenti di campo magnetico in esame, della loro tridimensionalità e dell'effetto prodotto dalla combinazione delle stesse (sovrapposizione degli effetti).

Per rispondere a queste esigenze la NoField srl, grazie alla esperienza acquisita in molte applicazioni reali, ha sviluppato un software di valutazione di impatto ambientale dei campi magnetici denominato MAGIC (MAGnetic Induction Calculation).

MAGIC 1.0 è un software per la valutazione dei livelli di induzione magnetica generati dalle più ricorrenti sorgenti di campo magnetico ai fini della valutazione di impatto ambientale e della determinazione delle fasce di rispetto.

I tre menù principali permettono di studiare singole sorgenti mediante configurazioni bidimensionali e tridimensionali attraverso l'integrazione della legge di Biot-Savart.

MAGIC 1.0 permette di analizzare 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. Particolare attenzione è stata data alla modellistica di componenti come i trasformatori di potenza presenti nelle cabine di trasformazione.

Grafici lungo linee, mappe cromatiche e linee isolivello permettono di visualizzare l'induzione magnetica nello spazio.



1. Premessa

L'esigenza di controllare i livelli di campo elettrico e magnetico prodotti da infrastrutture elettriche (linee, trasformatori, quadri, etc.) o dispositivi elettrici di tipo civile ed industriale (macchine operatrici, sistemi per il trattamento a induzione, sistemi di saldatura, etc.) nasce principalmente dalla necessità di tutelare la salute delle persone sia da effetti a breve che a lungo termine. Limitatamente ai campi elettromagnetici ambientali in bassa frequenza (BF) ¹, essi danno origine a correnti indotte in corpi conduttori. Il corpo umano è estremamente ricco di cariche libere ed il funzionamento di diverse attività fisiologiche, come la contrazione dei muscoli e del cuore, la trasmissione degli stimoli nervosi e molte altre è assicurato proprio da correnti ioniche endogene. Nel caso di esposizione a campi a bassa frequenza la corrente indotta che attraversa una sezione unitaria di tessuto, cioè la densità di corrente indotta A/m², viene quindi scelta come la quantità dosimetrica di base alla quale porre delle restrizioni di tipo protezionistico: essa può essere facilmente confrontata con i normali valori endogeni per valutare il suo potenziale rischio.

In tab. 1 sono riportati i valori di densità di corrente ed i relativi effetti sul corpo umano per ciò che concerne gli effetti accertati cosiddetti a "breve termine".

Tab. 1. Valori di densità di corrente ed i relativi effetti sul corpo umano

Densità di corrente (mA/m ²)	Effetti
1-10	Effetti biologici minori
10-100	Possibili effetti sul sistema nervoso
100-1000	Stimolazione dei tessuti eccitabili (nervi periferici): possibili rischi per la salute
> 1000	Extrasistole e fibrillazione ventricolare: rischi per la salute ben determinati

¹ Per basse frequenze, in questo caso, intendiamo quelle che vanno da 0 Hz fino a 3 MHz.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 57
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



Si considerano, rispetto ai valori riportati in Tab. 1, dei fattori di riduzione in relazione ai valori di corrente, assumendo come riferimento il valore di 100 mA/m². Si definiscono quindi i cosiddetti **limiti di base** ossia quei valori di densità di corrente da non superare al fine di garantire i lavoratori o la popolazione.

Il limite di base per i lavoratori (considerati come individui sani esposti per otto ore al giorno, ma in modo controllato, per tutta la vita lavorativa) è posto pari a 10 mA/m² (fattore di riduzione 10).

Il limite di base per il pubblico (in considerazione della presenza di soggetti più deboli o sensibili, come bambini anziani e persone ammalate, e la possibilità di esposizioni prolungate e inconsapevoli) è posto pari a 2 mA/m² (fattore di riduzione 50).

I corrispondenti limiti sono definiti limiti di base e rappresentano i veri limiti di carattere sanitario che non debbono essere superati in alcun caso.

Al di sopra di 1 kHz i valori limiti di base diminuiscono con l'aumentare della frequenza, poiché le soglie di stimolazione dei tessuti presentano andamento decrescente.

La evidente difficoltà di valutare i limiti di base hanno posto la necessità di correlare tali limiti a dei valori di campo magnetico o elettrico in presenza dei quali il corpo umano è interessato da correnti indotte inferiori ai limiti di base. Tali limiti vengono definiti **limiti di azione**² e nel paragrafo successivo sono riportati i principali riferimenti normativi che li riguardano. Occorre anche sottolineare che i **limiti di azione** vengono anche impiegati per i cosiddetti effetti a "**lungo termine**" ossia quegli effetti che non accertati ma sui quali esiste ancora oggi una intensa discussione a livello scientifico-sanitario, politico ed ambientale.

2. Legislazione italiana e internazionale

Al fine di meglio comprendere l'ambito di applicabilità del software **MAGIC 1.0** e l'importanza della valutazione dei livelli di induzione magnetica occorre fare una breve sintesi sugli aspetti normativi e legislativi nazionali ed internazionali.

In Italia, nel corso degli anni, l'attenzione della popolazione verso le problematiche dell'inquinamento elettrico e magnetico in BF hanno spinto a legiferare sia a livello regionale sia a livello nazionale creando situazioni di grande difformità sul territorio in nazionale.

² Limite di esposizione: è il valore di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, considerato come valore di immissione, definito ai fini della tutela della salute da effetti acuti, che non deve essere superato in alcuna condizione di esposizione dalla popolazione e dei lavoratori.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 58
			RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI	



Si sono succedute, a partire dal 1988, diversi decreti che hanno avuto nella Legge Quadro 36 del 22 Febbraio 2001 (con Decreto attuativo del Presidente del Consiglio dei Ministri dell' 8 luglio 2003) un inquadramento generale.

La legge quadro ha aggiunto ai limiti di esposizione ³ i cosiddetti valori di attenzione ⁴ e gli obiettivi di qualità ⁵ che hanno portato ad imporre in Italia limiti tra i più bassi in Europa. Occorre sottolineare che la legge quadro si riferisce alla sola esposizione a campi elettrici e magnetici alla frequenza di 50 Hz generati da elettrodotti (linee elettriche aeree ed in cavo, cabine e stazioni elettriche) mentre nel caso di sorgenti diverse dalle infrastrutture elettriche citate e funzionanti a frequenza diversa dei 50 Hz occorre far riferimento ai limiti definiti dalla Raccomandazione CEE 12 Luglio 1999 – Linee guida ICNIRP [1].

In merito alle fasce di rispetto per gli elettrodotti, si osserva che ai sensi dell'art. 8 del citato D.P.C.M. 8 luglio 2003, dall'entrata in vigore dello stesso, sono stati abrogati i decreti del Presidente del Consiglio dei Ministri 23 aprile 1992 e 28 settembre 1995. Conseguentemente non risultano più applicabili le disposizioni di cui all'art. 5 del D.P.C.M. 23 aprile 1992, dove si stabilivano le distanze di rispetto da qualunque conduttore della linea con riferimento ai fabbricati adibiti ad abitazione o ad altra attività che comporta tempi di permanenza prolungati (10 m per le linee a 132 kV, 18 m per le linee a 220 e 28 m per le linee a 380 kV).

Per la determinazione delle fasce di rispetto si deve quindi fare riferimento all'art. 6 comma 1 del D.P.C.M. 8 luglio 2003, dove si stabilisce che l'ampiezza deve essere coerente con gli obiettivi di qualità di cui all'art. 4, ovvero tale da limitare l'esposizione nelle aree gioco per l'infanzia, negli ambienti abitativi, negli ambienti scolastici ed in generale nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore, ad un valore dell'induzione magnetica (da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio) non superiore a 3 μ T.

Per ciò che concerne la protezione dei lavoratori, la posizione italiana è allineata a quella europea attraverso il recepimento della Direttiva 2004/40/CE del Parlamento Europeo e del

³ Il limite di esposizione è conforme al resto d'Europa e indica che non deve essere superato il valore di 100 μ T.

⁴ Valore di attenzione: è il valore di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, considerato come valore di immissione, che non deve essere superato nei luoghi adibiti a permanenze prolungate. Per maggiore cautela i provvedimenti stabiliscono che nelle aree gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere, si assume per l'induzione magnetica il valore di attenzione di 10 μ T.

⁵ Obiettivi di qualità: sono i criteri localizzativi, gli standard urbanistici, le prescrizioni e le incentivazioni per l'utilizzo delle migliori tecnologie disponibili, indicati dalle leggi regionali e i valori di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, definiti dallo Stato ai fini della progressiva mitigazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici. Nella progettazione di nuovi elettrodi in corrispondenza di aree e luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore e nella progettazione di nuovi insediamenti civili e industriali il limite fissato è di 3 μ T per il valore dell'induzione magnetica, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BIO28F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 59
			RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI	



Consiglio del 29 aprile 2004 [2]. Inizialmente il recepimento è avvenuto attraverso il Decreto Legislativo n. 257 del 19 novembre 2007 (ormai decaduto), successivamente dal testo unico sulla sicurezza sul lavoro (L.gs n.81, 9 aprile 2008). Il successivo slittamento, deciso dal Consiglio Europeo, del termine di recepimento dell'entrata in vigore della direttiva ⁶ ha ritardato l'obbligo da parte del datore di attuare, qualora necessari, i necessari provvedimenti di mitigazione dei campi ma non quello della valutazione di rischi ⁷.

In Fig. 1 è riportato l'andamento dei limiti di campo dell'ICNIRP che sono richiamati della Direttiva 2004/40/CE. Un importante intervallo di frequenze che riguarda diverse applicazioni industriali (es. saldatura, riscaldamento ad induzione, trattamenti termici, etc.) è quello tra 0.82 kHz e 65 kHz in cui il limite di campo è pari a circa 30.7 μ T. L'obbligo normativo della valutazione e verifica dei livelli di campo magnetico può essere effettuato in due fasi successive.

Come si può osservare alla frequenza di 50 Hz il limite del campo è pari a 500 μ T e quindi pari a cinque volte quello per la popolazione (ICNIRP) ma risulta pari a 50 volte il valore di attenzione e a circa 167 volte l'obiettivo di qualità. Anche se ovviamente il D.P.C.M. del 08.07.03 si riferisce alla popolazione e non ai lavoratori occorre precisare che la fissazione dei limiti di 10 e 3 μ T si pongono come obiettivo per ridurre i rischi da esposizioni prolungate e quindi protegge dai cosiddetti effetti a lungo termine mentre il limite per la protezione dei lavoratori di 500 μ T, rappresenta un valore da non superare mai per proteggere dagli effetti a breve termine. Assumere, quando sia possibile anche per il lavoratore che permane per più di 4 ore in un luogo ove sono presenti sorgenti di campi magnetici, gli stessi limiti previsti per la popolazione, rappresenta una condizione conservativa apprezzata sia dai lavoratori che dai medici del lavoro. Per tale motivo la valutazione di impatto ambientale legata ad esempio alla distribuzione di energia in ambito industriale (linee in cavo, condotti sbarra o cabine elettriche di trasformazione MT-BT) che

⁶ Il Capo IV del Titolo VIII del decreto 81/2008 (il testo unico), che contiene il recepimento della 2004/40, entrerà infatti in vigore il 30 aprile 2012, come da articolo 306, in quanto la direttiva 2008/46/CE (pubblicata il 26 aprile) ha modificato la 2004/40 portandone il termine di recepimento al 30 aprile 2012.

⁷ La valutazione dei rischi da campi elettromagnetici va comunque fatta ai sensi del capo I del titolo VIII (che entra in vigore subito ma sarà sanzionabile 90 giorni dopo la pubblicazione del decreto, quindi a fine luglio), ed in particolare dell'articolo 181, anche attraverso il richiamo all'art. 28. Certo, il superamento dei limiti non sarà direttamente sanzionabile, ma comunque il 181 (e tutto il capo I del titolo VIII) aggiungono molto rispetto al vecchio 626.

L'IspeI ed il coordinamento delle regioni stanno già lavorando ad una prima guida applicativa, dove si raccomanderà alle aziende di attivare subito la valutazione facendo comunque riferimento al capo IV, fermo restando che l'organo di vigilanza potrà sanzionare l'omessa valutazione del rischio (e quel che ne consegue), ma non le violazioni direttamente riconducibili agli articoli del capo IV.



difficilmente produce livelli di induzione inferiori a 500 μT ma che supera in molti casi i valori di 3 e 10 μT risulta significativa e degna di approfondimento.

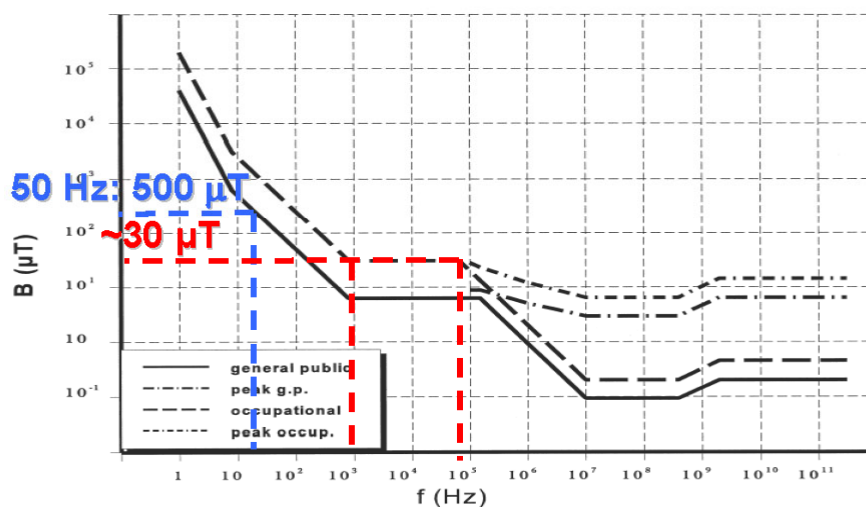


Fig. 1. Raccomandazione CEE 12 Luglio 1999 – Linee guida ICNIRP

Infine alcune considerazioni anche ai campi statici (0 Hz) prodotti da corrente continua, di particolare interesse in quanto risultano essere di grande diffusione impianti fotovoltaici di potenza significativa (anche diversi MW) e talvolta viene richiesto di valutare i livelli di campo imputabili alle connessioni DC (Direct Current) tra pannelli fotovoltaici e inverter. A differenza dei campi sinusoidali, tali campi non interferiscono con i corpi conduttori, e quindi nemmeno nel corpo umano, inducendo delle correnti elettriche e pertanto non sono soggetti a particolari restrizioni di tipo normativo o legislativo. L'unica restrizione suggerita per i campi statici è riportata nel:

“Council Recommendation del 12 Luglio 1999”, pubblicato nel G.u.c.e n. 199:

“Official Journal of the European Communities” del 30 Luglio 1999.

In cui il valore limite dell'induzione magnetica è di $4 \cdot 10^4 \mu\text{T}$.

Occorre però rilevare che persone con stimolatori cardiaci, impianti ferromagnetici e dispositivi elettromedicali impiantati potrebbero non essere protette dai limiti riportati per la popolazione. La maggior parte degli stimolatori cardiaci non sono verosimilmente disturbati in campi al di sotto di 0,5 μT ; pertanto i portatori di pacemaker e di defibrillatori impiantati dovrebbero evitare luoghi



dove l'induzione magnetica sia superiore a $0,5 \mu\text{T}$. Altri sistemi elettronici vitali, quali protesi auricolari elettroniche, pompe per insulina, protesi attive a controllo elettronico e sistemi per la stimolazione muscolare possono essere suscettibili a induzioni magnetiche statiche superiori a pochi μT , specialmente se la persona si muove all'interno del campo.

Quindi per dispositivi realizzati secondo le normative vigenti, i valori al di sotto dei quali è garantita l'assenza di malfunzionamenti dovuta all'interferenza con i campi statici sono riportate in Tab 2.

Tab. 2 Linee guida sui limiti di esposizione a campi magnetici statici raccomandati dall'ICNIRP

Casi particolari di popolazione	Limite di esposizione
Portatori di pacemaker e defibrillatori	$500 \mu\text{T}$
Portatori di protesi auricolari elettroniche, pompe per insulina, protesi attive a controllo elettronico e sistemi di stimolazione muscolare	Poche migliaia di μT

La necessità di considerare sorgenti campo statiche (frequenza 0) o lentamente variabili (ossia quelle riconducibili all'ambito della bassa frequenza) è stata considerata in **MAGIC 1.0** ed il software è in grado di effettuare valutazioni di induzioni magnetica sia alla frequenza 0 sia a frequenza diversa da 0.

La valutazione di impatto ambientale di sorgenti di campo magnetico caratterizzato da più sorgenti differenti frequenze sarà oggetto di uno sviluppo successivo del software.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 62
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



3. La valutazione di impatto ambientale

Il calcolo dei livelli di induzione magnetica prodotti da una qualunque sorgente consente di effettuare la cosiddetta valutazione di impatto ambientale (VIA). Uno dei principali risultati che emergono da una VIA magnetica è rappresentato dalla “fascia di rispetto”, ossia quella area o volume al di fuori della quale è garantito che il livello di induzione magnetica sia inferiore ad un dato limite.

Per quanto riguarda una valutazione di prima approssimazione della fascia di rispetto (Distanza di prima approssimazione DPA) è possibile, in Italia, fare riferimento al Decreto Ministeriale del 29/05/2008 “Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti” con particolare riferimento all’art. 5 comma 5.1.3 “Procedimento semplificato: calcolo della distanza di prima approssimazione” che introduce il concetto di Distanza di Prima Approssimazione (Dpa) e della possibilità di utilizzare le formule riportate dalla norma 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 1: Linee elettriche aeree e in cavo” del 1 aprile 2006.

Occorre sottolineare che la valutazione della DPA (distanza di prima approssimazione), secondo la procedura indicata nel decreto 29/05/2008 risulta difficilmente applicabile a situazioni impiantistiche come cabine o stazioni elettriche in quanto caratterizzate da layout e composizione difficilmente riconducibili al caso in esame.

La complessità della sorgente in esame richiede una valutazione più accurata che tenga conto principalmente della tridimensionalità delle singole sorgenti e dell’effetto prodotto dalla combinazione delle stesse (sovrapposizione degli effetti).

Il software MAGIC 1.0 tenendo conto di tutti questi aspetti permette al tecnico di effettuare una valutazione di impatto ambientale rispondente alle esigenze indicate.

Esiste però una problematica, come indicato nell’art. 5.1.2 (Calcolo delle fasce di rispetto per linee elettriche) del decreto del 29/05/2008, che riguarda i modelli tridimensionali i quali 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

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 63
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



controlli". Si ritiene che il software **MAGIC 1.0**, nascendo da anni sviluppo in ambito accademico e ampiamente utilizzato per valutazioni di impatto ambientale, risponda ai requisiti del Decreto.

4. Ipotesi generali dei modelli di calcolo

Al fine di procedere ad una adeguata valutazione di impatto ambientale, è necessario utilizzare un'adeguata modellazione matematica che sia in grado di descrivere i campi magnetici presenti in alcune condizioni tipiche di impianto.

Due modelli base sono stati implementati al fine di simulare le principali sorgenti di campo: **conduttori filiformi e avvolgimenti toroidali**.

La geometria della sorgente rappresenta una delle principali ipotesi che occorre scegliere nella fase di impostazione dello studio. Vi sono infatti sorgenti, come le linee in cavo interrato, che risultano essere prevalentemente invarianti per traslazione e per esse è sufficiente un modello bidimensionale in cui i conduttori si considerano praticamente infiniti. Se al contrario occorre valutare l'induzione magnetica in prossimità di una variazione di direzione il modello non può più essere bidimensionale ed occorre in questo caso effettuare uno studio di tipo tridimensionale.

Proprio sull'ipotesi geometrica **MAGIC 1.0** suddivide configurazioni bidimensionali (2D) da geometrie strettamente tridimensionali (3D).

Nelle due sezioni 2D e 3D sono state riportate le configurazioni più comuni nelle infrastrutture elettriche alimentate con terne di correnti equilibrate. Configurazioni più complesse nella geometria (es. differenti interassi tra i conduttori della terna, più cambi di direzione, etc.) o nel sistema di alimentazione (es. terne non equilibrate, presenza del neutro, più di due terne, etc.) possono essere comunque studiate utilizzando il modulo **multi condutture**, valido sia in 2D sia in 3D.

Esiste infine inoltre una terza sezione di calcolo in cui vengono proposte geometrie tipiche di infrastrutture elettriche tipiche del trasporto e della distribuzione dell'energia.

4.1 Sorgenti filiformi 2D e 3D

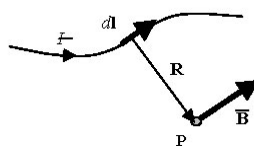
La procedura di calcolo delle **sorgenti lineari** 2D e 3D si basa sull'integrazione della legge di Biot-Savart, che consente di determinare il valore del campo e dell'induzione magnetica in ogni punto dello spazio a partire dalla conoscenza della geometria delle linee elettriche e delle sorgenti di

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BIO28F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 64
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



campo (intensità e fase delle correnti elettriche). In particolare, un conduttore percorso da una corrente pari ad i produce nello spazio circostante considerato omogeneo (aria) un'induzione magnetica $\mathbf{B}$ dato dall'integrale:

$$\overline{\mathbf{B}} = \mu_0 \int \frac{\overline{I} d\mathbf{l} \times \mathbf{R}}{4\pi R^3}$$



in cui:

- $d\mathbf{l}$ è un vettore di lunghezza infinitesima, tangente al conduttore ed orientato nel verso della corrente;
- $\mathbf{R}$ è un vettore distanza tra il punto sul conduttore ed il punto P in cui si vuole determinare il campo;
- μ_0 è la permeabilità assoluta (assunta per l'aria) pari a $4\pi 10^{-7}$;

Per quanto riguarda la valutazione dei campo magnetici prodotti da sorgenti 2D il software **MAGIC 1.0** implementa le formule della norma CEI 211-4 "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche", inoltre consente la valutazione delle fasce di rispetto in accordo con la CEI 106-11 "Guida per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotto secondo le disposizioni del DPCM 08/07/2003".

Rispetto alle normative citate **MAGIC 1.0** permette anche la valutazione di campi magnetici prodotti da sorgenti 3D definiti da tratti rettilinei, la valutazione è stata integrata in modo rigoroso e simbolico a partire dalla legge di Biot-Savart in forma locale (vedi allegato 1). L'integrale viene effettuato per ogni conduttore del sistema ed i contributi vengono sommati. Il metodo risulta quindi del tutto generale sia per il numero sia per la tipologia dei conduttori. E' opportuno ricordare che, trattando correnti sinusoidali ed adottando il Metodo Simbolico, il campo risultante è un vettore le cui componenti spaziali hanno una intensità definita mediante un numero complesso. Il risultato che viene restituito all'utente è il modulo dell'induzione magnetica nei diversi punti di calcolo. **E' importante osservare che se in ingresso vengono forniti i valori efficaci delle correnti in uscita verrà fornito il valore efficace dell'induzione magnetica (valore a cui fanno riferimento le norme tecniche e le restrizioni legislative).**

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BIO28F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 65
			RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI	



Per quanto riguarda l'intensità della corrente con cui viene effettuato il calcolo questa può essere scelta dall'utente. Generalmente la condizione di funzionamento utilizzata nella modellazione è in genere quella più cautelativa in cui i componenti trasferiscono la loro potenza nominale e vengono considerati trascurabili effetti di schematura dovuti agli involucri (es. box quadri). Trattandosi di **modelli lineari** il calcolo effettuato con una corrente può essere scalato per intensità di corrente diverse da quella di calcolo.

4.2 Sorgenti toroidali 3D

Il modello degli avvolgimenti toroidali permette di simulare sorgenti quali ad esempio i trasformatori a secco, i quali, a differenza di quelli in olio che sono racchiusi dentro un involucro che funge da schermo ai campi magnetici dispersi, possono generare campi significativi.

La modellizzazione degli avvolgimenti toroidali è stata effettuata mediante due approcci i cui uno rigoroso ed uno semplificato. I due modelli sono quindi caratterizzati da differente complessità e conseguente tempo di calcolo. Nel caso di valutazione di induzioni magnetiche a distanze superiori ad un metro dal trasformatore i due modelli sono equivalenti mentre nel caso di calcolo in punti molto vicini al trasformatore il modello rigoroso risulta più accurato (vedi allegato 2).

MAGIC 1.0 è l'unico software commerciale che attualmente implementa il modello esatto del calcolo dei campi dispersi dai trasformatori a secco. All'interno del software sono definiti, sulla base della potenza del trasformatore, i principali parametri geometrici che permettono all'operatore di effettuare il calcolo dell'induzione magnetica senza conoscere altri dati se non la potenza nominale del trasformatore.

4.3 Configurazioni impiantistiche

Vi sono alcune configurazioni tipiche di tipo impiantistico che ricorrono spesso nella pratica e richiedono una sovrapposizione degli effetti di diverse sorgenti. Nel software **MAGIC 1.0** viene dedicata una sezione con l'obiettivo di aggiornarla con sempre nuove tipologie di sorgenti nelle versioni future. Nella versione **MAGIC 1.0** vengono presentate 3 tipologie di sorgenti: zona di giunzione di una linea AT in cavo, cabina di trasformazione MT/BT e affiancamenti di linee in cavo AT.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 66
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



4.3.1. Zona di giunzione AT

Nelle zone di giunzione di cavi unipolari di linee AT i tre conduttori della linea stessa, generalmente posti vicini in configurazione in piano o a triangolo, sono distanziati trasversalmente tra loro anche talvolta fino ad un metro. Tale allontanamento crea un innalzamento dei livelli di induzione magnetica che, alla corrente nominale può portare anche al superamento di 100 μT . La regione della giunzione è quindi spesso oggetto di valutazioni accurate dei livelli di induzione magnetica e di successiva schermatura, essendo il limite di 100 μT associato ad effetti a breve termine, deve essere soddisfatto in qualunque istante e nei luoghi in cui vi può essere una permanenza anche per pochi istanti da parte del pubblico (ICNIRP).

MAGIC 1.0 permette lo studio magnetico delle zone di giunzione mediante un modello 3D preimpostato di tipo parametrico. L'utente non deve quindi costruire la geometria del sistema ma semplicemente impostare i valori dei parametri di progetto.

4.3.2 Affiancamento di linee in cavo AT

Le linee elettriche di trasporto in AT sono oggetto di accurate valutazioni di impatto ambientale. Generalmente le linee sono costituite da terne (il neutro non viene esercito in AT) di cavi unipolari in rame o alluminio che vengono posate in piano o a trifoglio. Essendo i conduttori a contatto l'interasse risulta pari a circa il diametro del cavo (circa 10 cm) e questo permette una limitazione dell'induzione magnetica grazie alla compensazione delle tre correnti. Nel contempo però la profondità di interrimento si aggira in genere intorno ad 1.5 m. Questi due fattori geometrici fanno sì che le linee in cavo producano campi magnetici relativamente elevati sopra il tracciato della linea ma che decadono rapidamente allontanandosi dalla stessa. In genere, per una linea che porta circa 1000 A si hanno valori di induzione tra i 10 ed i 20 μT e fasce di rispetto, associate all'obiettivo di qualità di qualche metro. Valori leggermente maggiori possono essere rilevati in prossimità degli attraversamenti stradali ove i cavi, essendo posti all'interno di tubazioni, sono maggiormente distanziati.

Esiste quindi la necessità di effettuare, prima dell'installazione di una nuova linea di trasporto, una accurata valutazione di impatto ambientale al fine di determinarne la fascia di rispetto ed in taluni casi è importante valutare il contributo del campo magnetico che la nuova linea genererà sul campo preesistente. Si presenta spesso la situazione in cui il tracciato di una linea è posto in vicinanza di altre linee, aeree o in cavo.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 67
			RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI	



MAGIC 1.0 permette lo studio dell'affiancamento parallelo di un numero arbitrario di terne in cui l'utente deve impostare solo alcuni semplici parametri geometrici (es. interasse tra conduttori, interasse tra terne, profondità di interrimento, etc.). Situazioni più complesse quali incroci ed affiancamenti non paralleli sono oggetto di futuri sviluppi del software ma possono già essere studiati in **MAGIC 1.0** attraverso il modello multi conduttore 3D.

4.3.3 Cabina elettrica MT/BT

La necessità di valutare l'impatto magnetico delle cabine elettriche secondarie (ossia quelle di trasformazione MT/BT) è una esigenza sentita in un discreto numero di casi. A livello nazionale, come già detto è richiesto il raggiungimento dell'obiettivo di qualità ($3 \mu\text{T}$) ma vi sono paesi come la Svizzera in cui sono richiesti limiti ancora più bassi ($1 \mu\text{T}$). Si stima che circa l'1% delle cabine elettriche, principalmente in ambito civile, richieda un intervento di mitigazione al fine di portare i livelli di induzione ai livelli richiesti. Dato che il numero di cabine elettriche è stimato in europa in diversi milioni di unità si può comprendere l'ampiezza del problema.

I componenti principali di un cabina, da cui poi derivano diversi livelli di impatto magnetico sull'ambiente, sono: i cavi di MT in entrata in cabina, le connessioni MT e BT tra il trasformatore ed i rispettivi quadri MT e BT, i quadri MT e BT ed il trasformatore MT/BT.

Di questi componenti risultano essere determinanti soprattutto le connessioni ed i quadri BT ed il trasformatore, nel caso di trasformatore in resina.

MAGIC 1.0 permette lo studio di cabine elettriche fino a 4 trasformatori, in cui è possibile tenere conto dei diversi aspetti progettuali e di installazione:

- a) Scelta tra trasformatore in resina o in olio: nel caso di trasformatore in resina viene considerato il contributo dei campi dispersi degli avvolgimenti secondo il modello sopra descritto
 1. posizionamento dei trasformatori all'interno della cabina e orientamento
 2. scelta della potenza del trasformatore: oltre a definire le correnti di calcolo in base alla potenza sono definite le dimensioni geometriche degli avvolgimenti e delle uscite BT da cui dipendono i livelli di induzione generati
 3. percentuale di utilizzo del trasformatore
 4. uscite BT del trasformatore in diverse posizioni: posteriori, centrali, anteriori, verso l'alto (per connessioni in canalina) o verso il basso (per connessioni a pavimento in cunicolo)

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 68
			RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI	



b) Linee BT caratterizzate da:

1. n. arbitrario di tratti
2. corrente impostabile o impostata direttamente nel caso di linee di connessione alle uscite BT dei trasformatori
3. tipologia semplice terna, doppia terna, trasposizione delle fasi, etc.
4. differente interasse tra i cavi

c) Quadri MT:

1. posizionamento del quadro
2. più scomparti partenze linee MT verso trasformatori di cabina
3. scomparti per linee entra-esce
4. linee MT di connessione (escluse quelle ad elica visibile considerate ad impatto magnetico trascurabile)

d) Quadri di smistamento BT:

1. posizionamento del quadro
2. scomparti partenze linee BT
3. n. interruttori BT su ogni scomparto

Mentre per le linee elettriche i modelli, i metodi e gli strumenti di calcolo si possono dire assestati e mediante formule chiuse o mediante semplici integrazioni numeriche ben più complessa risulta la valutazione dei campi prodotti dai trasformatori.

In questi casi si ricorre spesso a metodi numerici che richiedono complessi software (es. software basati sul metodo degli elementi finiti) in cui è possibile effettuare una accurata valutazione dei campi magnetici interni ed esterni alla sorgente. Mentre lo studio della distribuzione dei campi magnetici interni ai dispositivi elettromagnetici è necessario per chi ne fa la progettazione, non è di interesse per chi ne deve solo valutare l'impatto ambientale.

Esiste quindi la necessità di ricercare dei modelli che consentano di ottenere una buona valutazione del campo magnetico esterno al dispositivo. In allegato 2 è riportato l'approccio teorico verificato anche sperimentalmente del modello adottato dal codice **MAGIC 1.0** nella modellizzazione del trasformatore.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 69
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



MAGIC 1.0 effettua un reale calcolo tridimensionale che tiene conto della sovrapposizione degli effetti delle diverse sorgenti. **MAGIC 1.0** permette all'utente di valutare quegli interventi di bonifica che possono essere attuati semplicemente giocando sulla trasposizione delle fasi o degli avvolgimenti e sulla scelta del percorso delle linee.

Dalle mappe cromatiche che forniscono i livelli di induzione è possibile determinare il fattore di abbattimento richiesto e quindi l'efficienza richiesta dall'eventuale sistema di schermatura.

Sono in sviluppo modelli di calcolo che verranno implementati nelle successive versioni che permetteranno di tenere conto anche di sistemi di schermatura passivi conduttivi o ferromagnetici.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 70
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



Allegato 1

Calcolo dell'induzione magnetica su di un tratto rettilineo di lunghezza finita

Considerando un tratto rettilineo e definito tra due punti $P_1(x_1, y_1, z_1)$ e $P_2(x_2, y_2, z_2)$ ed assumendo che la corrente è diretta da P_1 a P_2 l'induzione magnetica in un punto $Q(x_Q, y_Q, z_Q)$ risulta pari a:

$$\mathbf{B}(Q) = \mu_0 \int_{P_1}^{P_2} \frac{i}{4\pi} \cdot \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{R}}{R^3} \quad (1)$$

In cui:

$$d\mathbf{l} = dx\mathbf{a}_x + dy\mathbf{a}_y + dz\mathbf{a}_z \quad \mathbf{R} = (x_Q - x)\mathbf{a}_x + (y_Q - y)\mathbf{a}_y + (z_Q - z)\mathbf{a}_z$$

Utilizzando l'espressione parametrica di una linea retta:

$$\begin{cases} x = x_1 + (x_2 - x_1)t \\ y = y_1 + (y_2 - y_1)t \\ z = z_1 + (z_2 - z_1)t \end{cases} \quad (2)$$

Il prodotto esterno $d\mathbf{l} \times \mathbf{R}$ e la distanza R risultano pari a:

$$d\mathbf{l} \times \mathbf{R} = dt(k_x\mathbf{a}_x + k_y\mathbf{a}_y + k_z\mathbf{a}_z) \quad R^3 = (at^2 - bt + c)^{\frac{3}{2}}$$

In cui i coefficienti sono pari a:

$$\begin{cases} k_x = y_1(z_2 - z_Q) + y_2(z_Q - z_1) + y_Q(z_1 - z_2) \\ k_y = -x_1(z_2 - z_Q) - x_2(z_Q - z_1) - x_Q(z_1 - z_2) \\ k_z = x_1(y_2 - y_Q) + x_2(y_Q - y_1) + x_Q(y_1 - y_2) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} a = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 \\ b = 2[(x_1 - x_2)(x_1 - x_Q) + (y_1 - y_2)(y_1 - y_Q) + (z_1 - z_2)(z_1 - z_Q)] \\ c = (x_1 - x_Q)^2 + (y_1 - y_Q)^2 + (z_1 - z_Q)^2 \end{cases} \quad (4)$$

La soluzione analitica finale implementata all'interno del software MAGIC 1.0 risulta quindi essere:

$$\mu_0 \int_{P_1}^{P_2} \frac{i}{4\pi} \cdot \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{R}}{r^3} = i \cdot 10^{-7} (k_x\mathbf{a}_x + k_y\mathbf{a}_y + k_z\mathbf{a}_z) \int_0^1 \frac{dt}{(at^2 - bt + c)^{\frac{3}{2}}} =$$

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 71
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



$$\begin{aligned}
 &= i \cdot 1 \cdot 10^{-7} (k_x a_x + k_y a_y + k_z a_z) \frac{2(2at - b)}{(4ac - b^2) \sqrt{at^2 - bt + c}} \Big|_0^l = \\
 &= i \cdot 1 \cdot 10^{-7} (k_x a_x + k_y a_y + k_z a_z) \frac{2(2a\sqrt{c} - b\sqrt{c} + b\sqrt{a - b + c})}{\sqrt{c}(4ac - b^2) \sqrt{a - b + c}} \quad (5)
 \end{aligned}$$

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 72
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



Allegato 2

Calcolo dell'induzione magnetica prodotta da un trasformatore trifase a secco

Il modello proposto si basa sullo scomporre il problema di campo del trasformatore nel problema di calcolo del campo interno e di quello esterno al nucleo. Il campo magnetico interno al nucleo del trasformatore è legato alle caratteristiche fisiche e geometriche del nucleo stesso ed è dovuto alla componente magnetizzante della forza magnetomotrice data dalla differenza tra le amperspire di primario e secondario. Al contrario, il campo magnetico esterno è poco influenzato dalle caratteristiche del nucleo e dalla forza magnetomotrice magnetizzante, ma dipende principalmente dal fatto che gli avvolgimenti di primario e secondario sono concentrici ma con raggio differente. Nel modello viene trascurata la presenza del nucleo e si considerano tre coppie di avvolgimenti, di primario e secondario, in cui ciascuna coppia è alimentata con amperspire uguali in modulo ed in opposizione di fase (Fig. 2).

Il modello degli avvolgimenti può quindi essere sviluppato con diversi modelli analitici che consentono di giungere ad una formulazione che permette di inserire il modello del trasformatore all'interno dell'ambiente di sviluppo che integra il contributo delle linee elettriche.

Facendo riferimento alla Fig. 3, i parametri geometrici determinanti per la valutazione dei campi magnetici disperse sono:

N_1 : numero spire avvolgimenti primari di media tensione (MT),

N_2 : numero spire avvolgimenti secondari di bassa tensione (BT),

D_{MT} : diametro medio avvolgimenti primari media tensione (MT);

D_{BT} : diametro medio avvolgimenti secondari tensione (BT);

H_{AVV} : altezza avvolgimenti BT e MT

D_{AVV} : distanza asse avvolgimenti o asse colonne.

Questi parametri assumono valori diversificati a seconda del tipo e delle dimensioni del trasformatore, e molto spesso la loro conoscenza non è facilmente accessibile per il valutatore dell'impatto ambientale. Tuttavia, va notato che i trasformatori di distribuzione sono realizzati da tutti i costruttori con criteri di progettazione simili ed hanno in genere dimensioni standard, le quali dipendono della potenza nominale del trasformatore stesso. Attraverso l'applicazione delle relazioni costruttive che legano i dati di targa del trasformatore alle principali dimensioni

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BIO28F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 73
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



geometriche è possibile disporre di modelli “medi” che consentono di valutare in modo approssimato ma soddisfacente i campi magnetici esterni ⁽⁸⁾

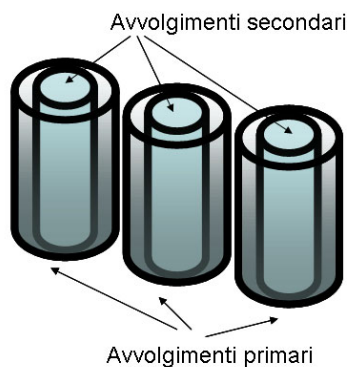


Fig. 2. Avvolgimenti primary e secondari

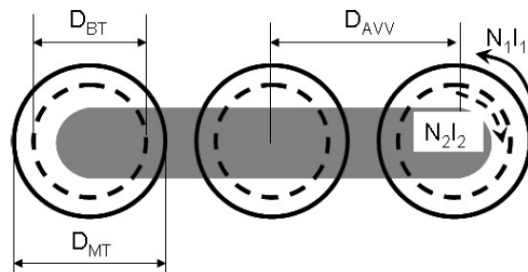


Fig. 3. Parametri geometrici caratteristici per la valutazione dei campi magnetici esterni

Nel seguito verranno descritti i due modelli adottati all'interno del MAGIC. Entrambi sono basati sul campo magnetico generato da una spira circolare filiforme ma il primo presenta un grado di semplificazione che permette di definire il campo del dipolo mediante una formula chiusa, il secondo invece permette di ottenere una soluzione più accurata grazie all'utilizzo di formule di quadratura per l'integrazione numerica.

Modello semplificato

Si consideri il dipolo magnetico rappresentato in Fig. 4. Volendo calcolare il potenziale vettore nel punto P è necessario risolvere il seguente integrale di linea:

$$A = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_C \frac{dl'}{R_1} \quad (6)$$

Una volta noto il potenziale vettore è possibile calcolare il vettore induzione magnetica essendo $B = \nabla \times A$. Il valore di R_1 descrive la distanza dal punto P all'elemento infinitesimo dl' e si ha che

$$dl' = (-a_x \sin \phi' + a_y \cos \phi') b d\phi' \quad (7)$$

⁸ 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.

 TECINTAL	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 74
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



$$R_1^2 = R^2 + b^2 - 2bR \cos \psi = R^2 + b^2 - 2bR \sin \theta \sin \phi' \quad (8)$$

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R} \left(1 + \frac{b^2}{R^2} - \frac{2b}{R} \sin \theta \sin \phi' \right)^{-1/2} \quad (9)$$

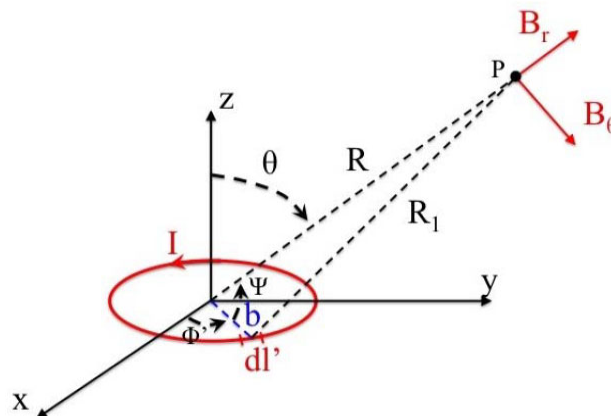


Fig. 4. Componenti del campo prodotto dal dipolo magnetico

Sostituendo (9) in (6) si ottiene un integrale che non è risolvibile in forma chiusa a meno di non introdurre la seguente ipotesi semplificativa $R^2 \gg b^2$ che permette di ottenere la seguente espressione di $1/R_1$:

$$\frac{1}{R_1} \approx \frac{1}{R} \left(1 - \frac{2b}{R} \sin \theta \sin \phi' \right)^{-1/2} \quad (10)$$

Infine facendo lo sviluppo in serie di Taylor del risultato ottenuto è possibile eliminare la radice ottenendo l'espressione seguente:

$$\frac{1}{R_1} \approx \frac{1}{R} \left(1 - \frac{2b}{R} \sin \theta \sin \phi' \right)^{-1/2} \approx \frac{1}{R} \left(1 + \frac{b}{R} \sin \theta \sin \phi' \right) \quad (11)$$

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 75
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



A patto quindi di accettare che il calcolo del campo sia corretto principalmente per punti la cui distanza dal dipolo è molto maggiore del raggio del dipolo stesso, è possibile sostituire le equazioni (7) e (11) in (6) ottenendo un integrale risolvibile in formula chiusa.

Infine applicando, essendo $B = \nabla \times A$ si ottengono le componenti di campo⁹:

$$B = \frac{\mu_0 I b^2}{4R^3} (a_R \cos \theta + a_\theta \sin \theta) \quad (12)$$

Si noti come le componenti del campo dipendano solo da uno dei diversi angoli introdotti in Fig LG_1, cioè l'angolo θ . Tale risultato era intuibile poiché la geometria del dipolo è una geometria assialsimmetrica. Infine, dall' eq. (6) è possibile derivare le componenti B_x , B_y e B_z mediante semplici considerazioni geometriche.

Il risultato ottenuto viene utilizzato al fine di sviluppare un modello semplificato del trasformatore dove le tre colonne vengono rappresentate da N_2^{10} dipoli magnetici di primario e N_2 dipoli magnetici di secondario come rappresentato in Fig. 5. Per ogni dipolo costituente il trasformatore vengono calcolate le componenti B_x , B_y e B_z ed infine, mediante sovrapposizione degli effetti, viene ricavato il campo globale nel punto in considerazione.

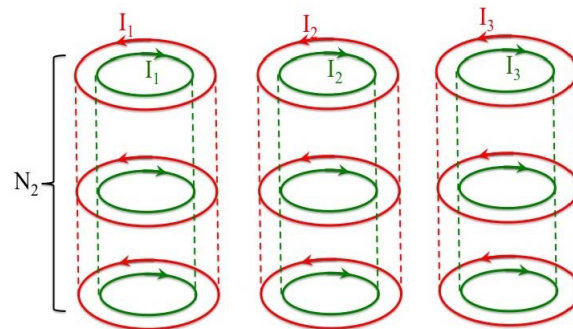


Fig. 5. Componenti del campo prodotto dal dipolo magnetico

⁹ D. K. Cheng, "Field and wave electromagnetics", Addison-Wesley Publishing Company

¹⁰ N_2 = numero di spire dell'avvolgimento secondario



Modello accurato

Il calcolo dell'induzione magnetica creato da una spira circolare filiforme è facilmente esprimibile in coordinate cilindriche r , z , poiché, essendo il dipolo una geometria assialsimmetrica, la componente poloidale del campo è identicamente nulla.

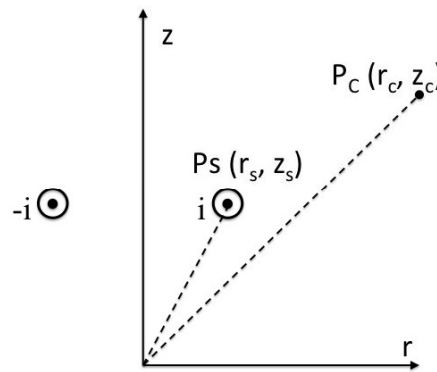


Fig. 6. Rappresentazione della spira circolare mediante coordinate cilindriche

Dalla formula di Biot-Savart, integrando la curva della spira, si può ottenere il valore del campo magnetico e di induzione magnetica in ogni punto del piano (r - z). Con riferimento alla Fig. 6 la posizione della spira è data dalle coordinate del centro del conduttore della spira rispetto all'origine $P_s = (r_s, z_s)$, mentre il punto in cui viene calcolato il campo (punto campo: P_c) ha coordinate $P_c = (r_c, z_c)$ come mostrato in Fig. 6. L'espressione radiale (r) ed assiale (z) delle componenti dell'induzione magnetica sono le seguenti:

$$b_r = i \cdot \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(z_c - z_s)k}{r_c \sqrt{r_c r_s}} \left(-K(k) + \frac{r_s^2 + r_c^2 + (z_c - z_s)^2}{(r_c - r_s)^2 + (z_c - z_s)^2} E(k) \right) = i \cdot f_r(r_s, r_c, z_s, z_c) \quad (13)$$

$$b_z = i \cdot \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{k}{r_c \sqrt{r_c r_s}} \left(K(k) + \frac{r_s^2 - r_c^2 - (z_c - z_s)^2}{(r_c - r_s)^2 + (z_c - z_s)^2} E(k) \right) = i \cdot f_z(r_s, r_c, z_s, z_c) \quad (14)$$

dove i è la corrente attraverso la spira filiforme, k è l'argomento degli integrali ellittici di primo e secondo tipo (K ed E), definito da:

$$k = \frac{4r_s r_c}{(r_c - r_s)^2 + (z_c - z_s)^2} \quad (15)$$

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 77
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



Mentre gli integrali ellittici sono rispettivamente:

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} d\theta \quad (16)$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad (17)$$

Le formule ricavate per la spira circolare possono essere utilizzate per calcolare l'induzione magnetica prodotta dal solenoide a sezione rettangolare rappresentato in Fig. 7.

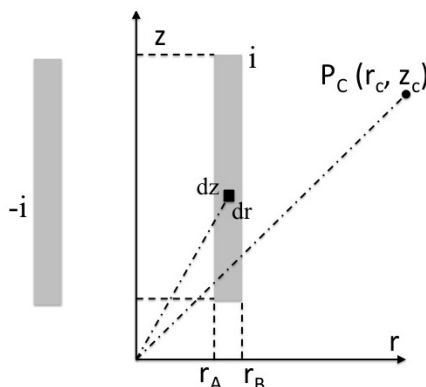


Fig. 7. Rappresentazione del solenoide a sezione rettangolare mediante coordinate cilindriche

Se la sezione è interessata da passaggio della corrente totale " i ", la densità di corrente (ipotizzata costante) nella sezione sarà pari a

$$J = \frac{i}{(r_B - r_A) \cdot (z_B - z_A)} \quad (18)$$

Considerando una porzione di area infinitesima $ds = dr \cdot dz$ si ha che il campo prodotto nel punto PC è pari a:

Considerando una superficie infinitesima con sezione trasversale $ds = dr \cdot dz$ del solenoide, percorsa dalla corrente $i' = J \cdot dr \cdot dz$, il contributo elementare ai componenti di induzione magnetica sono:

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BIO28F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 78
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



$$db_r = J \cdot dr dz \cdot f_r(r_s, r_C, z_s, z_C) \quad (19)$$

$$db_z = J \cdot dr dz \cdot f_z(r_s, r_C, z_s, z_C) \quad (20)$$

Integrando sulla sezione trasversale del solenoide si ottiene il contributo complessivo:

$$B_r = \int_{z_A}^{z_B} \int_{r_A}^{r_B} J \cdot f_r(r_s, r_C, z_s, z_C) \cdot dr dz \quad (21)$$

L'integrale viene calcolato numericamente utilizzando formule adattative di quadratura che siano in grado di mantenere l'accuratezza uniforme del risultato indipendentemente dalla distanza del P_C dai punti sorgente P_S all'interno del solenoide.

Il **MAGIC 1.0** permette di rappresentare un trasformatore mediante 6 solenoidi a sezione rettangolare. A due a due i solenoidi rappresentano una colonna del trasformatore. In Fig. 8 la singola colonna è rappresentata nel suo sistema di riferimento locale. La densità di corrente è strettamente legata alle amperspire del trasformatore: $J_k = N_2 I_k / [(r_B - r_A)(z_B - z_A)]$.

Il campo complessivo si ricava facendo la sovrapposizione degli effetti dei contributi associati ai sei solenoidi a sezione rettangolare che costituiscono le tre colonne.

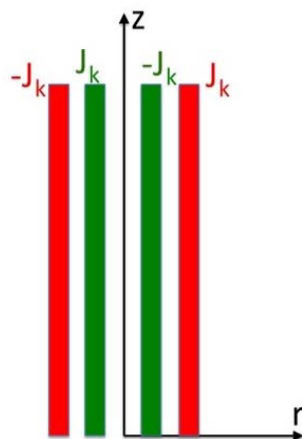


Fig. 8. Rappresentazione trasformatore mediante sei solenoidi a sezione rettangolare

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 79
			RELAZIONE CAMPI ELETTROMAGNETICI	

8. ALLEGATO B: DOCUMENTO DI VALIDAZIONE DEL SOFTWARE



Documento di Validazione

Algoritmi di calcolo del software MAGIC[®] (MAGnetic Induction Calculation)

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 80
			RELAZIONE CAMPI ELETTRROMAGNETICI	



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

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: B1028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 81
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



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 B è data dall'espressione:

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

in cui N è il numero dei conduttori, d è la distanza tra il conduttore k -esimo e il punto di calcolo; i vettori $\vec{u}_I$ 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 trave su semplice palificazione con corrente di 310 A. Come si può osservare dalla figura 1, le due curve sono praticamente coincidenti.



La configurazione analizzata mediante il codice sviluppato dal CESI porta alla distribuzione di campo riportata in Figura 3.

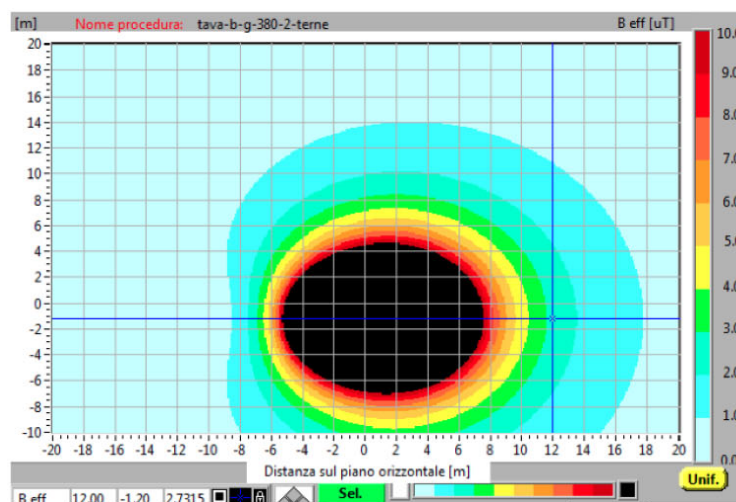


Figura 3: Mappa cromatica delle induzioni magnetiche calcolata mediante software CESI

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.

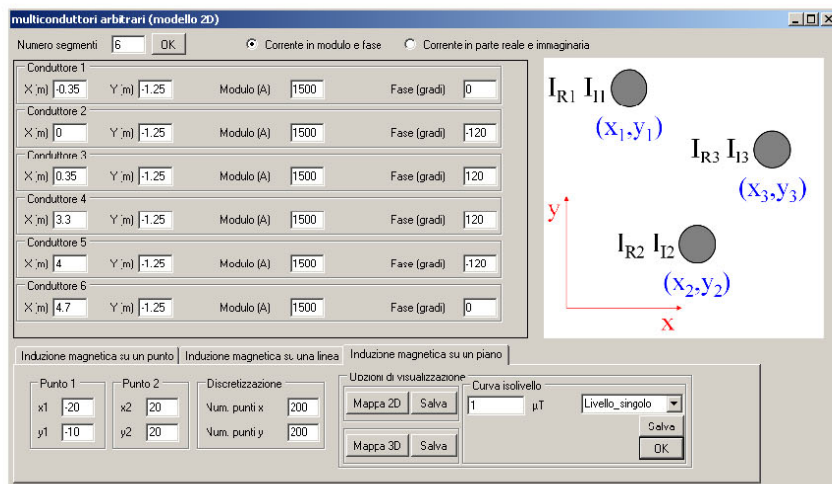


Figura 4:Schermata di ingresso modulo “multiconduttori arbitrari (modello 2D)”: dati definizione geometria e sorgenti



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

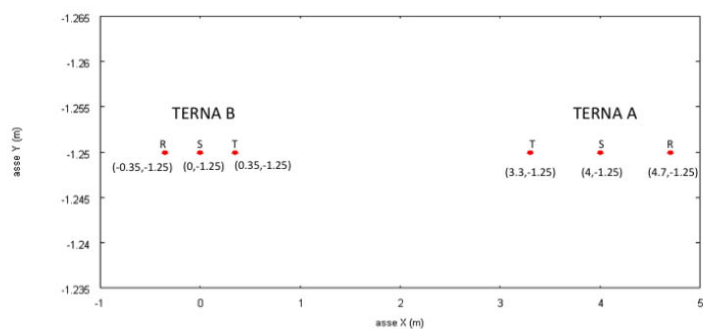


Figura 5: Geometria sorgenti

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

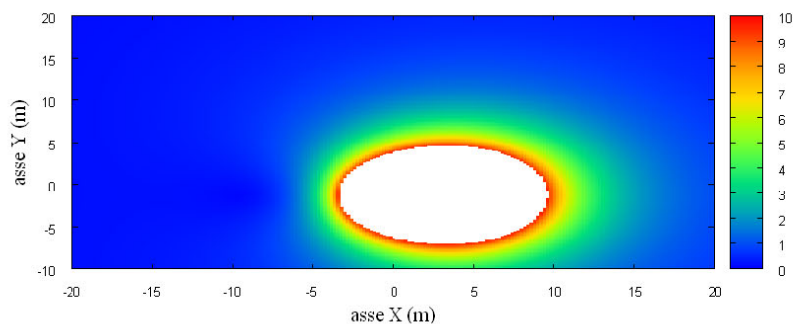


Fig. 6: Mappa cromatica dell’induzione magnetica ottenuta dal software MAGIC® (valori in microT):

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

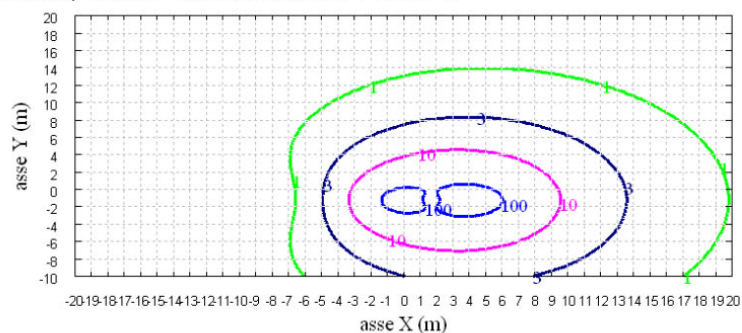


Fig. 7 Linee isolivello dell’induzione magnetica (1, 3, 10, 100 microT) da software MAGIC®.

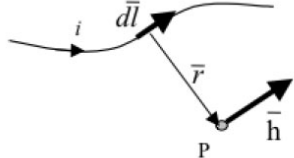
Come si può osservare le mappe cromatiche dei due modelli risultano essere in perfetto accordo.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 85
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



2 Verifica del modulo tridimensionale

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

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

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.

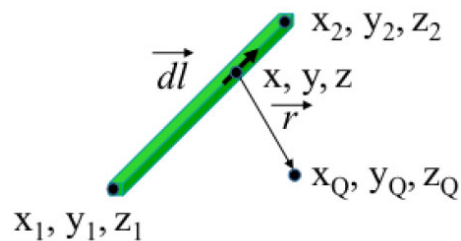


Fig. 8: Modello del segmento.

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

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

Si consideri inoltre che:

$$\begin{aligned} \vec{r} &= (x_Q - x)\vec{a}_x + (y_Q - y)\vec{a}_y + (z_Q - z)\vec{a}_z \\ d\vec{l} &= dx\vec{a}_x + dy\vec{a}_y + dz\vec{a}_z \end{aligned}$$

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

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 86
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI	



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.

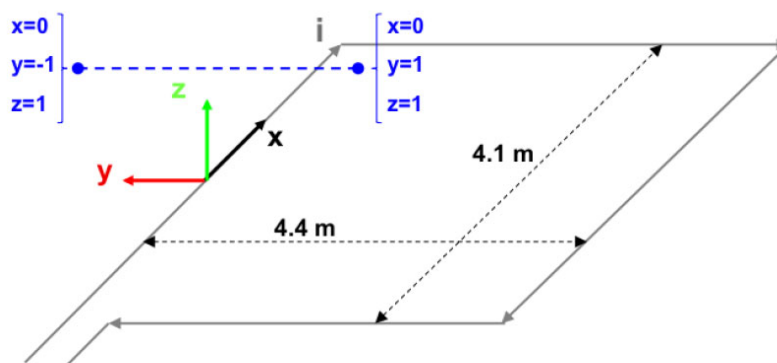


Fig. 9: Schema di spira quadrata.

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.

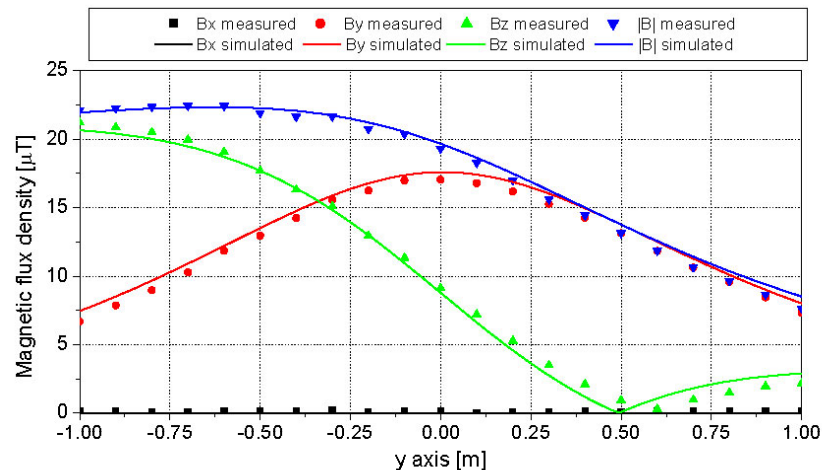


Fig. 10: Induzione magnetica misurata e calcolata mediante software MAGIC®.

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.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 88
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



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.

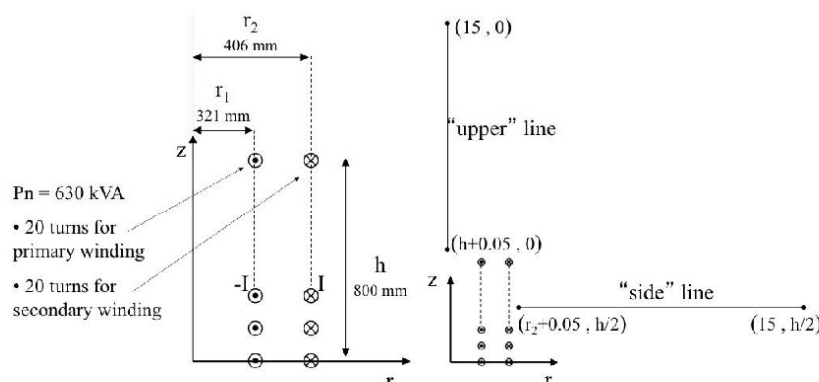


Fig. 11. Geometria del sistema (1) e linee di calcolo (2)

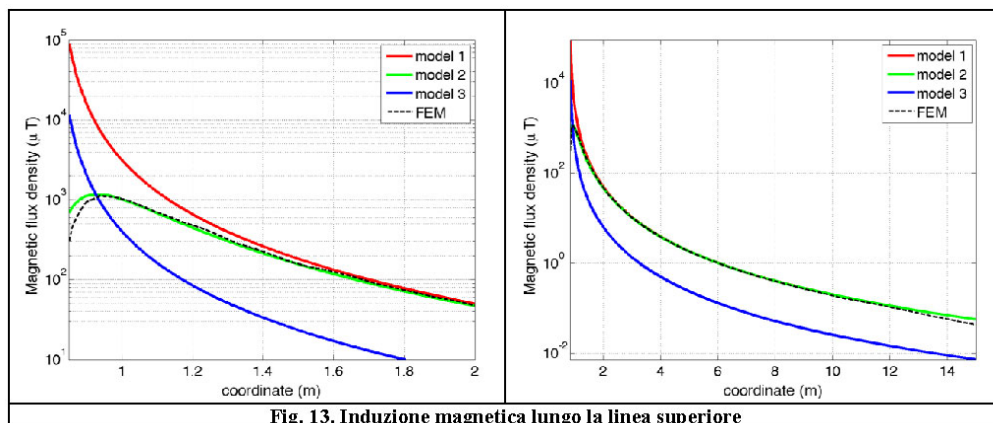
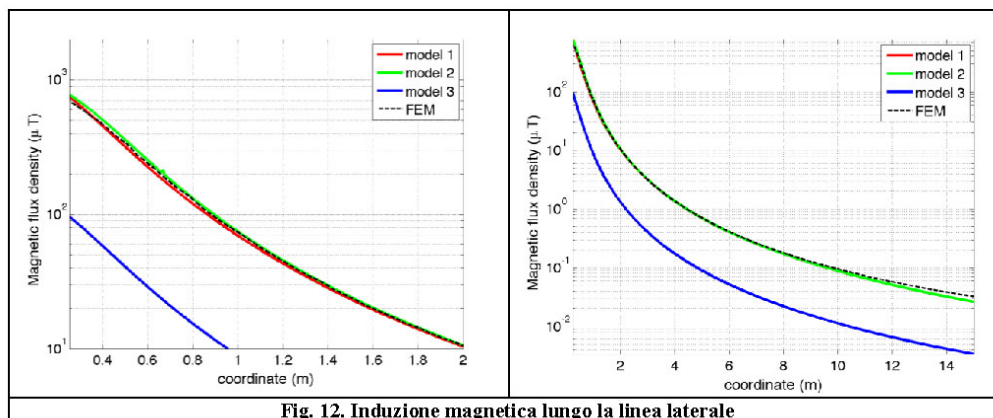
Le Fig. 12 e 13 mostrano, rispettivamente, i valori di induzione magnetica lungo la linea ad 1m dal lato degli avvolgimenti e lungo la linea ad 1.5 m sopra gli avvolgimenti. Le figure mettono a confronto il "modello 1 e 2" ed il calcolo, assunto come riferimento, effettuato mediante codice FEM.

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 e 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).



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.

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BIO28F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 90
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



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 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.

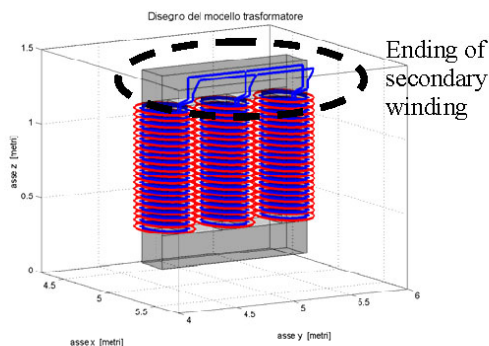


Fig. 14: Connessioni elettriche considerate al lati BT.

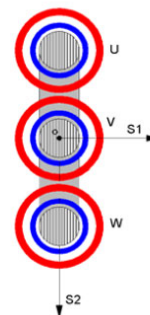


Fig. 15: Linee di calcolo S1 ed S2

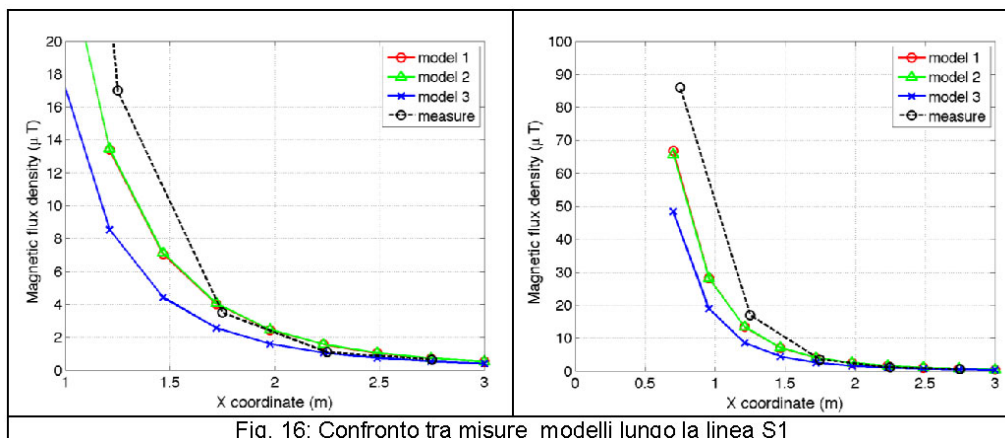


Fig. 16: Confronto tra misure modelli lungo la linea S1

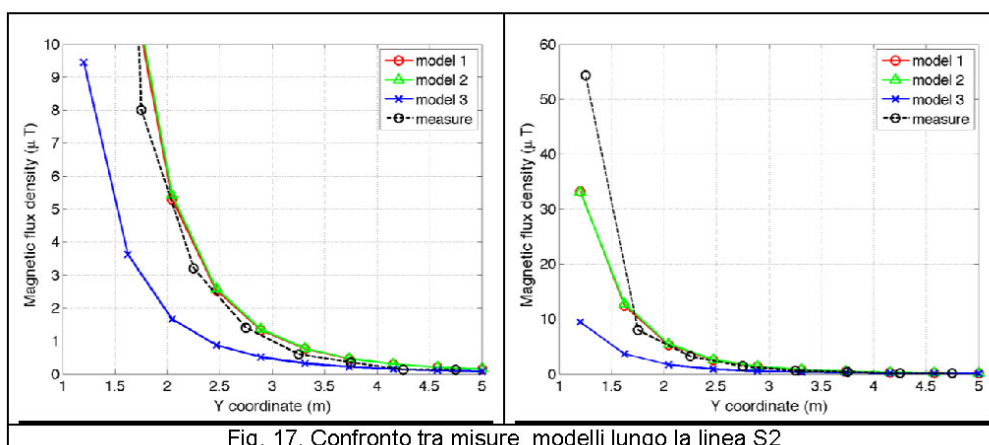


Fig. 17: Confronto tra misure modelli lungo la linea S2

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

	Rev. 0	Data: Agosto 2023	El: BI028F-D-PAL-RT-21-r00	Pag. 92
			RELAZIONE CAMPI ELETTRICI	



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 29/05/200, lasciando ovviamente alle autorità competenti la verifica ed il giudizio finale.