

**TITLE:** Relazione sui campi elettromagnetici

**AVAILABLE LANGUAGE:** IT

## RELAZIONE SUI CAMPI ELETTROMAGNETICI

Progetto di un impianto agrivoltaico della potenza complessiva di 103.314,00 kW<sub>p</sub> con sistema di accumulo di capacità pari a 20 MW e relative opere di connessione alla rete.

Da realizzarsi nei Comuni di Foggia, Manfredonia (FG) e Zapponeta (FG)

File: FOM.ENG.REL.017.00\_Relazione sui campi elettromagnetici.docx

REV.	DATE	DESCRIPTION	PREPARED	VERIFIED	APPROVED
00	07/02/2023	<b>Emissione Definitiva</b>	I.Olivieri	L.Spaccino A.Fata	V.Bretti

### CLIENT VALIDATION

Name	Discipline	PE
COLLABORATORS	VERIFIED BY	VALIDATE BY

### CLIENT CODE

IMP.			GROUP.			TYPE			PROGR.			REV	
F	O	M	E	N	G	R	E	L	0	1	7	0	0

**CLASSIFICATION** For Information or For Validation

**UTILIZATION SCOPE** Basic Design

This document is property of Foggia Solar S.r.l. It is strictly forbidden to reproduce this document, in whole or in part, and to provide to others any related information without the previous written consent by Foggia Solar S.r.l.

**INDICE**

1.0	INTRODUZIONE.....	3
2.0	QUADRO NORMATIVO E DEFINIZIONI.....	3
3.0	BASSE FREQUENZE.....	7
4.0	DIFFERENZA TRA CAMPI INDOTTI DA LINEE ELETTRICHE AEREE E CAVI INTERRATI .....	9
4.1	CAMPO ELETTRICO .....	9
4.2	CAMPO MAGNETICO.....	9
5.0	DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO .....	10
6.0	CALCOLO DELLE FASCE DI RISPETTO .....	14
6.1	CAVIDOTTI .....	14
6.2	TRANSFORMATION UNIT .....	31
6.3	TRASFORMATORE POWER CONVERTER STATION.....	32
6.4	CAMPO ELETTROMAGNETICO GENERATO DALLA SSU.....	33
7.0	CONCLUSIONI.....	34

## 1.0 INTRODUZIONE

La presente relazione costituisce la Relazione sui campi elettromagnetici prodotti dall'impianto agrivoltaico denominato "Foggia Manfredonia" di potenza nominale pari a 100 MW<sub>AC</sub>, integrato da un sistema di accumulo da 20 MW, sito nel Comune di Foggia (FG).

L'aumento degli ultimi anni dell'esposizione umana ai campi magnetici, elettrici ed elettromagnetici, ha portato il mondo scientifico a porsi il problema delle possibili conseguenze dannose, soprattutto per quanto riguarda i campi a frequenze industriale.

Questo perché in tempi molti ridotti si è avuto un aumento esponenziale della produzione dei campi elettrici e magnetici a frequenze estremamente basse (50 Hz) di origine artificiale, dovuti quasi esclusivamente alla generazione, alla trasmissione, alla distribuzione e all'uso dell'energia elettrica.

In Italia tale problematica è presente a causa del grande numero di linee ad alta tensione per l'energia elettrica, distribuite in modo massiccio su tutto il territorio. Gli impianti fotovoltaici, comunque, non creano ulteriori disagi, in quanto nella maggior parte dei casi utilizzano le linee già esistenti per il trasporto dell'energia da essi prodotta.

In alcuni limitati casi, però, non è possibile allacciarsi a reti già esistenti, per cui si rende necessaria la costruzione di linee apposite, andando quindi ad aumentare il numero di campi elettrici agenti sul territorio.

Infine, per ridurre ulteriormente la possibilità di interferenze con tali campi elettromagnetici, viene effettuato l'interramento totale dei cavidotti appartenenti al campo agrivoltaico, all'impianto BESS e di quelli di collegamento alla rete di trasmissione nazionale.

## 2.0 QUADRO NORMATIVO E DEFINIZIONI

Di seguito si riportano i principali riferimenti normativi pertinenti:

- **D.M. 21 marzo 1988, n.449** - Approvazione delle norme tecniche per la progettazione, l'esecuzione e l'esercizio delle linee aeree esterne.
- **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.
- **Norma CEI 211-4** - Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee e stazioni elettriche.
- **Linea Guida per l'applicazione del § 5.1.3 dell'allegato al DM 29.5.2008** - Distanza di prima approssimazione (DPA) da linee e cabine elettriche.
- **Raccomandazione Consiglio Ue 1999/519/CE** - Limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz.
- **Legge 22 febbraio 2001, n. 36** - Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici. Legge contenente le indicazioni generali circa

funzioni e competenze, piani di risanamento, catasto delle sorgenti, controlli e sanzioni, ai fini della tutela della popolazione e dei lavoratori dall'esposizione a campi elettromagnetici.

- **D.P.C.M. 08.07.2003** - 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. Decreto attuativo della legge quadro, fissa i limiti per le emissioni degli elettrodotti, definisce tecniche di misurazione e valutazione e dà indicazioni circa la determinazione delle fasce di rispetto.
- **D.M. 29.05.2008** - Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti. Contiene, in allegato, la metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti, definita da ISPRA e dal sistema delle Agenzie ambientali secondo quanto previsto dal **DPCM 08/07/2003**.
- "Linee guida in materia di impianti agrivoltaici", Ministero della Transizione Ecologica - Dipartimento per l'energia.
- LEGGE 29 luglio 2021, n. 108 "Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 31 maggio 2021, n. 77, recante governance del Piano nazionale di ripresa e resilienza e prime misure di rafforzamento delle strutture amministrative e di accelerazione e snellimento delle procedure".
- "Consultazione pubblica Misura PNRR Sviluppo Agrivoltaico: Piano di Ripresa e Resilienza, Missione 2 (Rivoluzione verde e Transizione ecologica), Componente 2 (Energia rinnovabile, idrogeno, rete e mobilità sostenibile), Investimento 1.1 (Sviluppo Agrovoltaico)".
- "Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima 2030 (PNIEC)", Ministero dello Sviluppo Economico (PNIEC\_finale\_17012020.pdf (mise.gov.it)).
- D.Lgs. 8 novembre 2021, n. 199, di recepimento della direttiva UE 2018/2001 del Parlamento europeo e del Consiglio sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, (Direttiva RED II).

In particolare, ai fini della protezione della popolazione dall'esposizione ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50Hz) generati da linee e cabine elettriche, il D.P.C.M. 8 luglio 2003 (artt. 3 e 4) stabilisce, in conformità alla Legge 36/2001 (art. 4, c. 2), quanto segue:

*Art.3, comma 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  $\mu$ T per l'induzione magnetica e 5 kV/m per il campo elettrico, intesi come valori efficaci.

*Art.3, comma 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  $\mu$ T, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

*Art.4, comma 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  $\mu$ T per il valore dell'induzione magnetica, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

*Art. 6, comma 1*

Per la determinazione delle fasce di rispetto si dovrà fare riferimento all'obiettivo di qualità di cui all'articolo 4 ed alla portata in corrente in servizio normale dell'elettrodotto, come definita dalla norma **CEI 11-60**, che deve essere dichiarata dal gestore al Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio, per gli elettrodotti con tensione superiore a 150 kV, e alle Regioni, per gli elettrodotti con tensione non superiore a 150 kV. I gestori provvedono a comunicare i dati per il calcolo e l'ampiezza delle fasce di rispetto ai fini delle verifiche delle autorità competenti.

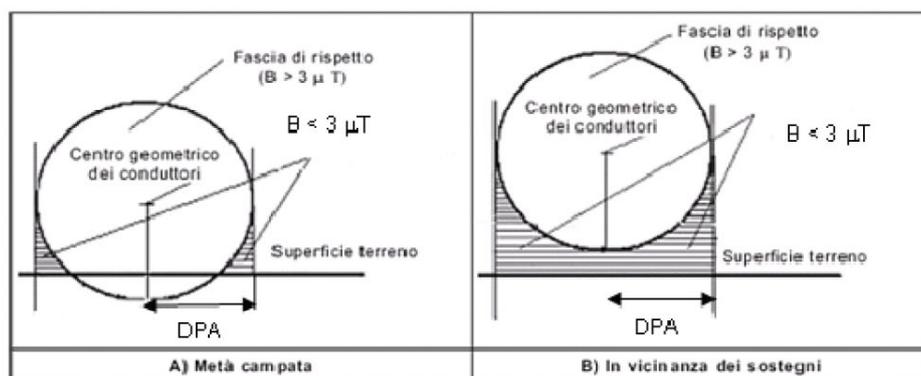
Si riportano di seguito alcune definizioni tratte dalla legge **36/2001**, dal D.P.C.M. 8 luglio 2003, e dal D.M. 29 maggio 2008, utili ai fini dell'inquadramento della materia trattata.

**Campata:** elemento minimo di una linea elettrica sotteso tra due sostegni.

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

**Elettrodotto:** è l'insieme delle linee elettriche, delle sottostazioni e delle cabine di trasformazione.

**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  $\mu$ 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.



**Figura 1: Schema Fasce di Rispetto e DPC in corrispondenza di metà campata e in vicinanza dei sostegni**

**Impianto:** officina elettrica destinata, simultaneamente o separatamente, alla produzione, allo smistamento, alla regolazione e alla modifica (trasformazione e/o conversione) dell'energia elettrica transitante in modo da renderla adatta a soddisfare le richieste della successiva destinazione. Gli impianti possono essere: Centrali di produzione, Stazioni elettriche, Cabine di Primarie e Secondarie e Cabine Utente.

**Limiti di esposizione:** nel caso di esposizione, della popolazione, a campi elettrici e magnetici, alla frequenza di 50 Hz generati da elettrodotti, non deve essere superato il limite di esposizione di 100  $\mu\text{T}$  per l'induzione magnetica e 5 kV/m per il campo elettrico, intesi come valori efficaci.

**Linea:** collegamento con conduttori elettrici, delimitato da organi di manovra, che permettono di unire due o più impianti.

**Luoghi tutelati:** aree di gioco per l'infanzia, ambienti abitativi, ambienti scolastici e luoghi adibiti a permanenza non inferiore a 4 ore giornaliere.

**Obiettivo di qualità:** nella progettazione di nuovi elettrodotti in corrispondenza di aree gioco per l'infanzia, di ambienti abitativi, di ambienti scolastici e di luoghi adibiti a permanenze giornaliere non inferiori a quattro ore e nella progettazione dei nuovi insediamenti e delle nuove aree di cui sopra in prossimità di linee ed installazioni elettriche già presenti nel territorio, ai fini della progressiva minimizzazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettrici e magnetici generati dagli elettrodotti operanti alla frequenza di 50 Hz, è fissato l'obiettivo di qualità di 3  $\mu\text{T}$  per il valore dell'induzione magnetica, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

**Portata in corrente in servizio normale:** è la corrente che può essere sopportata da un conduttore per il 100% del tempo con limiti accettabili del rischio di scarica sugli oggetti mobili e sulle opere attraversate e dell'invecchiamento. Essa è definita nella norma CEI 11-60.

**Sostegno:** elemento di supporto meccanico della linea aerea.

**Tratta:** porzione di tronco (campate contigue) avente caratteristiche omogenee di tipo elettrico, di tipo meccanico (tipologia del conduttore, configurazione spaziale dei conduttori sui

tralicci, ecc.) e relative alla proprietà.

**Tronco:** collegamento metallico che permette di unire fra loro due impianti.

**Valore di attenzione:** a titolo di misura di cautela per la protezione della popolazione 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 mT, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

### 3.0 BASSE FREQUENZE

I valori limite fissati nel caso di esposizione a campi elettrici e magnetici per le basse frequenze sono imposti dal D.P.C.M. 8-7-03, pubblicato sulla G.U. n.200 del 29 Agosto 2003, "Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni a campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti", sono riportati nella seguente tabella:

	Campo Elettrico [kV/m]	Induzione Magnetica [ $\mu$ T]
Limite di esposizione	5	100
Valore di attenzione	-	10
Obiettivo di qualità	-	3

Il decreto prevede, nel caso del limite di esposizione, che i valori di campo elettrico e campo magnetico siano espressi come valori efficaci mentre, per il valore di attenzione e l'obiettivo di qualità, l'induzione magnetica è da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio, in corrispondenza di aree gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere.

Si fa notare che i suddetti limiti non si applicano ai lavoratori professionalmente esposti che operano nel settore della costruzione, manutenzione, etc. poiché quest'ultimi sono sottoposti ad una differente normativa.

I campi ELF, contraddistinti da frequenze estremamente basse, sono caratterizzabili mediante la semplificazione delle equazioni di Maxwell dei "campi elettromagnetici quasi statici" e quindi da due entità distinte:

- **il campo elettrico**, generato dalla presenza di cariche elettriche o tensioni e quindi direttamente proporzionale al valore della tensione di linea;
- **il campo magnetico**, generato invece dalle correnti elettriche.



Dagli elettrodotti si genera sia un campo elettrico che un campo magnetico.

## **4.0 DIFFERENZA TRA CAMPI INDOTTI DA LINEE ELETTRICHE AEREE E CAVI INTERRATI**

### **4.1 Campo Elettrico**

Il campo elettrico risulta ridotto in maniera significativa per l'effetto combinato della speciale guaina metallica schermante del cavo e del terreno che presenta una conducibilità elevata. Per le linee elettriche di MT a 50 Hz, i campi elettrici misurati attraverso prove sperimentali sono risultati praticamente nulli, per l'effetto schermante delle guaine metalliche e del terreno sovrastante i cavi interrati.

### **4.2 Campo Magnetico**

Le grandezze che determinano l'intensità del campo magnetico circostante un elettrodotto sono principalmente:

- distanza dalle sorgenti (conduttori);
- intensità delle sorgenti (correnti di linea);
- disposizione e distanza tra sorgenti (distanza mutua tra i conduttori di fase);
- presenza di sorgenti compensatrici;
- suddivisione delle sorgenti (terne multiple).

I metodi di controllo del campo magnetico si basano principalmente sulla riduzione della distanza tra le fasi, sull'installazione di circuiti addizionali (spire) nei quali circolano correnti di schermo, sull'utilizzazione di circuiti in doppia terna a fasi incrociate e sull'utilizzazione di linee in cavo. I valori di campo magnetico risultano notevolmente abbattuti mediante interrimento degli elettrodotti. Questi saranno posti a circa 0,8 - 1,6 metri di profondità e sono composti da un conduttore cilindrico, una guaina isolante, una guaina conduttrice (la quale funge da schermante per i disturbi esterni, che sono più acuti nel sottosuolo in quanto il terreno è molto più conduttore dell'aria) e un rivestimento produttivo.

I cavi interrati generano, a parità di corrente trasportata, un campo magnetico al livello del suolo più intenso degli elettrodotti aerei (circa il doppio), però l'intensità di campo magnetico decresce molto più rapidamente con la distanza. Tra gli svantaggi sono da considerare i problemi di perdita di energia legati alla potenza reattiva (produzione, oltre ad una certa lunghezza del cavo, di una corrente capacitiva, dovuta all'interazione tra il cavo ed il terreno stesso, che si contrappone a quella di trasmissione).

Un altro metodo che consente di ridurre i valori d'intensità di campo elettrico e magnetico è rappresentato dall'adozione di "linee compatte", una soluzione che prevede il posizionamento dei cavi vicini tra di loro, ottenendo in questo modo una riduzione del campo magnetico in virtù della presenza delle membrane isolanti che rivestono i cavi. Confrontando il campo magnetico generato da linee aeree con quello generato da cavi interrati, si rileva che per i cavi interrati l'intensità massima del campo magnetico è più elevata, ma l'attenuazione è maggiore.

## 5.0 DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO

Il parco agrivoltaico in progetto, della tipologia grid-connected, ha una potenza di circa 100 MW<sub>AC</sub>, e sarà integrato da un sistema di accumulo di 20 MW. L'impianto sarà collegato in antenna a 150 kV su un futuro ampliamento della Stazione Elettrica (SE) a 380/150 kV della RTN, denominata Manfredonia, come indicato nella Soluzione Tecnica Minima Generale (STMG) fornita dal distributore di rete.

Per la posa delle linee elettriche necessarie per il raccordo con la rete di distribuzione (cfr. elaborato "FOM.ENG.TAV.031. \_Planimetria dei cavidotti con indicazione delle sezioni di posa") sono previste tre diverse tipologie di trincee profonde 0,9 m, e due profonde 1,2 m, di larghezza variabile a seconda del numero di cavidotti interrati:

- Una terna interrata: trincea larga 0,28 m e profonda 0,9 m;
- Due terne interrate nello stesso scavo: trincea larga 0,68 m e profonda 0,9 m;
- Tre terne interrate nello stesso scavo: trincea larga 1,08 m e profonda 0,9 m;
- Quattro terne interrate nello stesso scavo: trincea larga 0,68 m e profonda 1,2 m;
- Otto terne interrate nello stesso scavo: trincea larga 1,48 m e profonda 1,2 m.

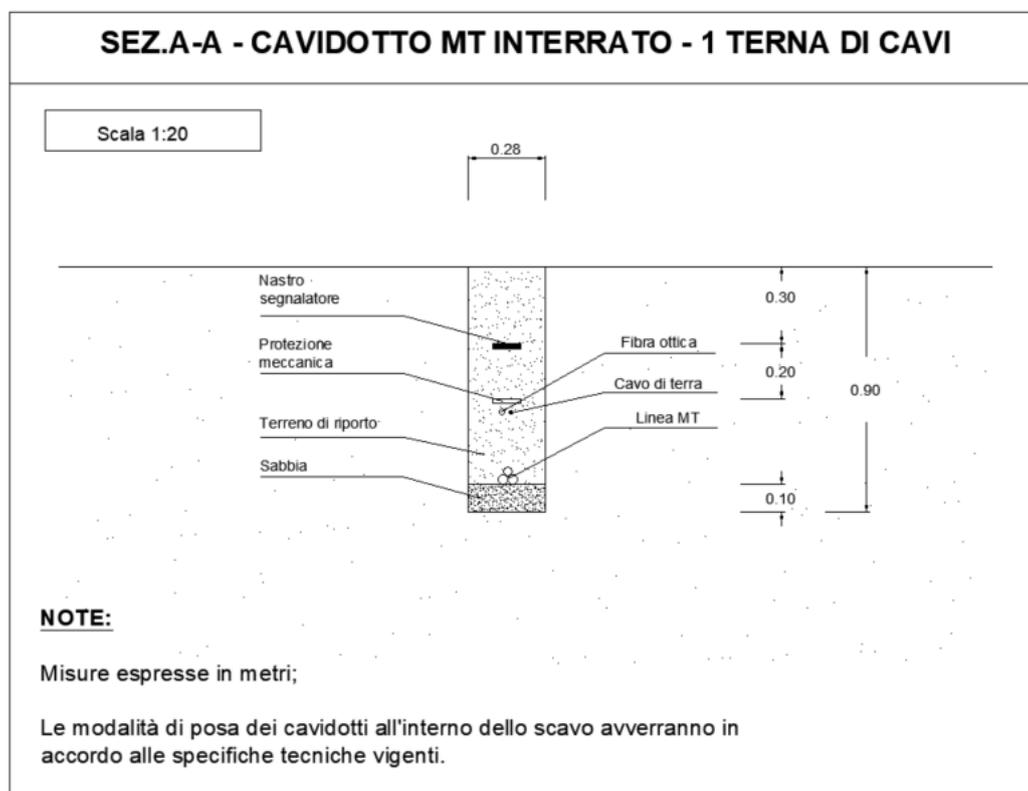
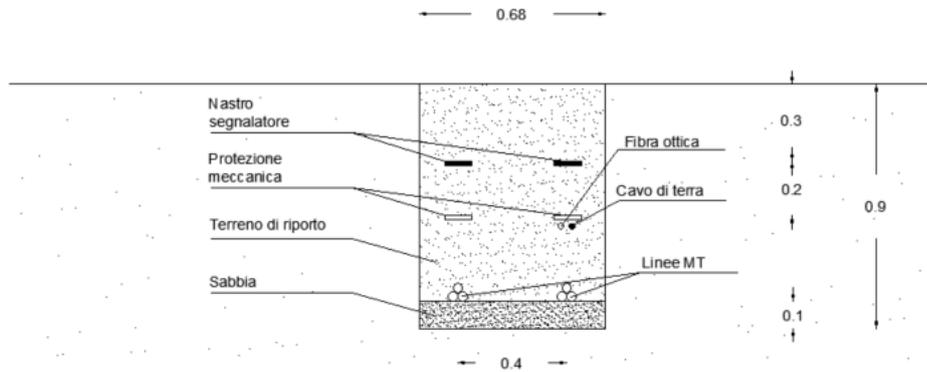


Figura 2 - Tipologico di posa per una terna di cavi MT nello stesso scavo

### SEZ.B-B - CAVIDOTTO MT INTERRATO - 2 TERNE DI CAVI

Scala 1:20



**NOTE:**

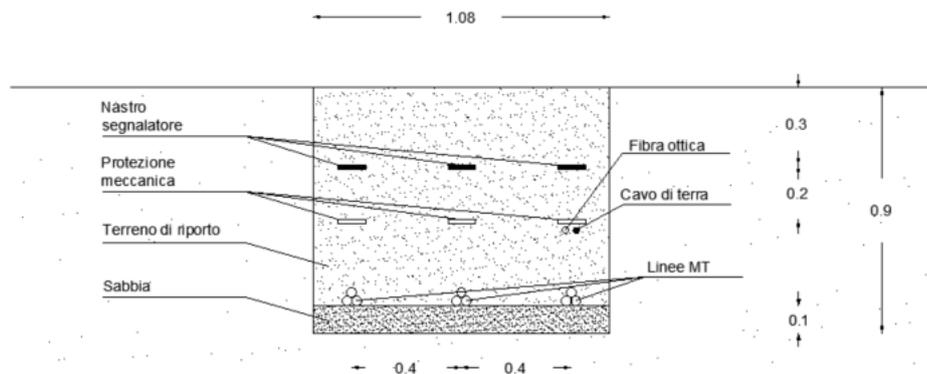
Misure espresse in metri;

Le modalità di posa dei cavidotti all'interno dello scavo avverranno in accordo alle specifiche tecniche vigenti.

Figura 3 - Tipologico di posa per due terne di cavi MT nello stesso scavo

### SEZ.C-C - CAVIDOTTO MT INTERRATO - 3 TERNE DI CAVI

Scala 1:20



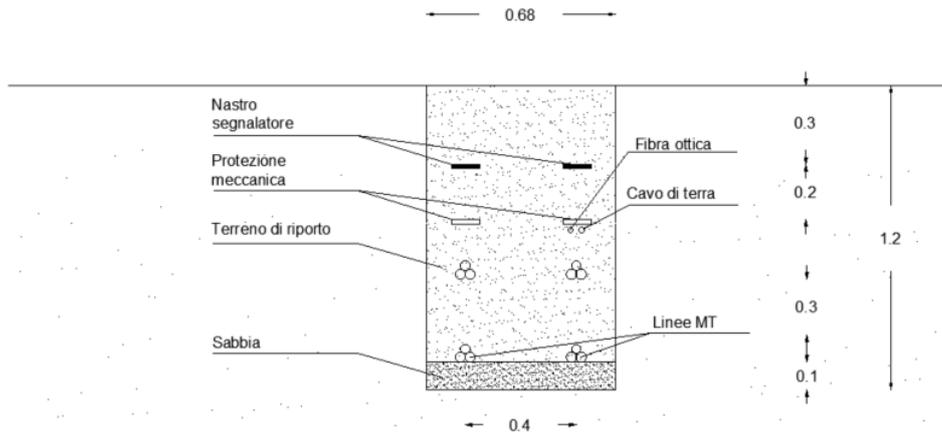
**NOTE:**

Misure espresse in metri;

Le modalità di posa dei cavidotti all'interno dello scavo avverranno in accordo alle specifiche tecniche vigenti.

Figura 4 - Tipologico di posa per tre terne di cavi MT nello stesso scavo

**SEZ.D-D - CAVIDOTTO MT INTERRATO - 4 TERNE DI CAVI MT**

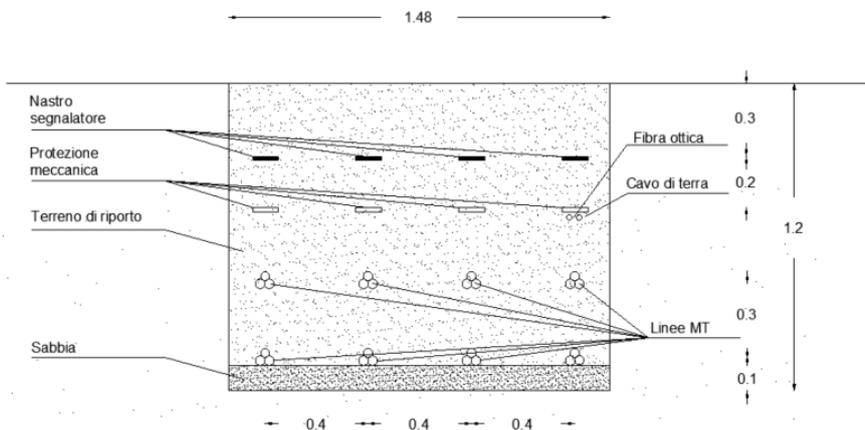


**NOTE:**

Misure espresse in metri;

Figura 5 - Tipologico di posa per quattro terne di cavi MT nello stesso scavo

**SEZ.F-F - CAVIDOTTO MT INTERRATO - 8 TERNE DI CAVI MT**



**NOTE:**

Misure espresse in metri;

Figura 6 - Tipologico di posa per otto terne di cavi MT nello stesso scavo

Per quanto riguarda i cavidotti per il trasporto dell'energia tra le transformation unit, la cabina utente e la cabina di consegna verranno impiegati cavi del tipo ARE4H5E con sezione variabile tra 120 e 800 mmq (cfr. elaborato "FOM.ENG.TAV.039. \_Schema elettrico unifilare-opere di rete").

Il trasporto dell'energia elettrica prodotta dai moduli della centrale fotovoltaica avverrà, nei tratti interni alle recinzioni di progetto, mediante cavi che verranno interrati.

La connessione alla rete avverrà tramite un collegamento in antenna a 150 kV su un futuro ampliamento della Stazione Elettrica (SE) a 380/150 kV della RTN di Manfredonia, come indicato nella Soluzione Tecnica Minima Generale (STMG) fornita dal distributore di rete.

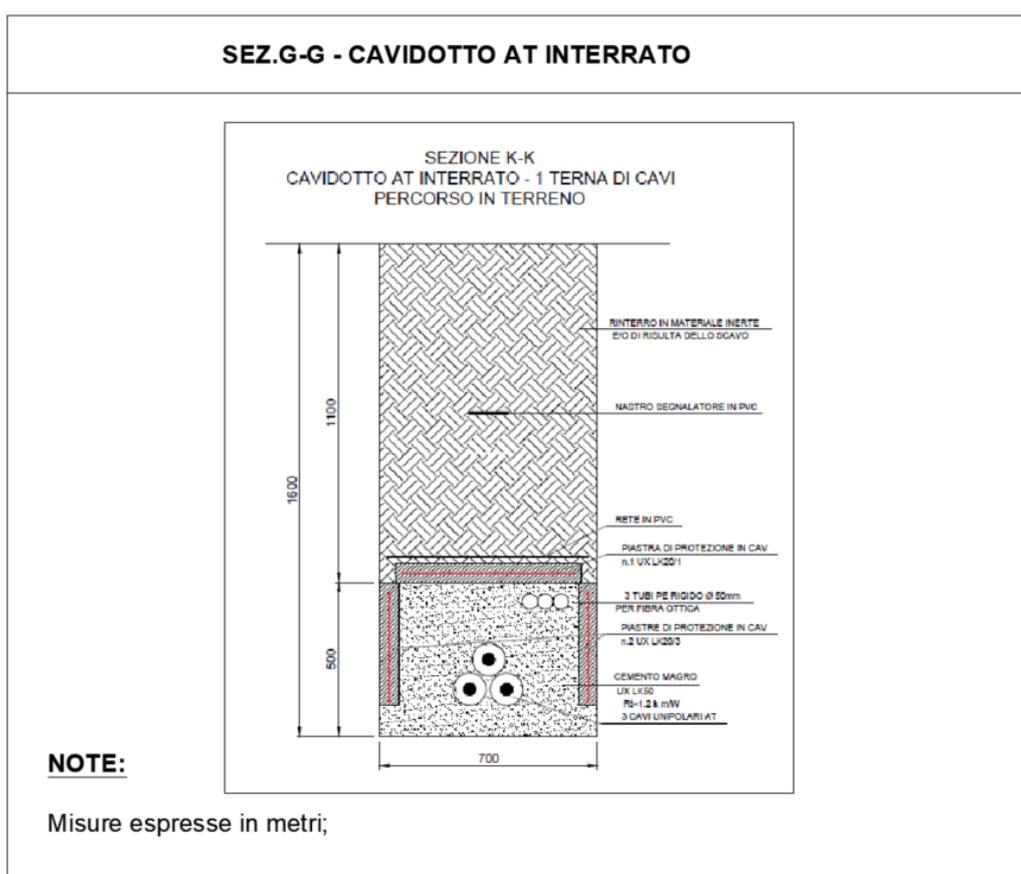


Figura 7 - Tipologico di posa per il cavidotto AT interrato

## 6.0 CALCOLO DELLE FASCE DI RISPETTO

### 6.1 Cavidotti

La norma CEI 106-11 definisce le formule per il calcolo dell'induzione magnetica prodotta da un sistema trifase di conduttori rettilinei disposti tra loro parallelamente e percorsi da una terna di correnti equilibrate e simmetriche. Successivamente dimostra che il campo magnetico nell'intorno dei cavi cordati ad elica è inferiore tanto più quanto è piccolo il passo dell'elica.

La norma CEI 211-4 fornisce invece le metodologie per il calcolo dei campi elettromagnetici generati dalle linee elettriche aeree ed interrate, sviluppate limitatamente a geometrie bidimensionali e applicabili a casi di interesse pratico.

Il valore del campo magnetico indotto dipende dal valore di corrente elettrica che attraversa il conduttore e dal numero di terne di cavidotti presenti all'interno dello scavo, dal momento che la presenza contemporanea di più terne provoca un incremento del campo magnetico. Occorre quindi tenere in considerazione le diverse modalità di posa dei cavidotti:

1. Scavo con una sola terna di cavi MT del tipo ARE4H5E;
2. Scavo con due terne di cavi MT del tipo ARE4H5E;
3. Scavo con tre terne di cavi MT del tipo ARE4H5E;
4. Scavo con quattro terne di cavi MT del tipo ARE4H5E;
5. Scavo con otto terne di cavi MT del tipo ARE4H5E.
6. Cavidotti di connessione alla rete del tipo ARE4H1H5E.

Non sono stati presi però in considerazione gli effetti dovuti alla presenza di eventuali linee elettriche interrate o aeree già in esercizio non facenti parte dell'impianto di progetto.

Di seguito vengono riportati i risultati delle elaborazioni eseguite per determinare la DPA. Si ricorda che, secondo quanto riportato nella "Linea Guida per l'applicazione del § 5.1.3 dell'allegato al DM 29.5.2008", la DPA ricavata viene approssimata per eccesso al metro successivo.

#### 1. Scavo con una sola terna di cavi, tipologia ARE4H5E

Nel caso degli scavi al cui interno è posata una sola terna di cavi, in accordo alla norma CEI 106-11 art. 6.2.3 b), la formula approssimata per il calcolo dell'induzione magnetica prodotta da conduttori unipolari disposti a trifoglio (come da scelta progettuale) è la seguente:

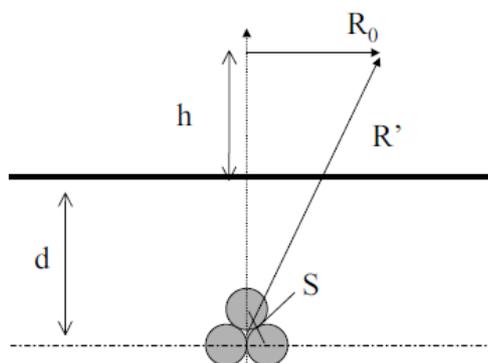
$$B = 0.1 * \sqrt{6} \frac{S * I}{R'^2} \quad [\mu T]$$

nella quale "S" rappresenta la distanza tra le generatrici delle terne dei conduttori, "I" è la corrente che percorre i cavi, "R'" è la distanza o raggio dal centro geometrico dei conduttori rispetto al quale corrisponde un valore di induzione magnetica "B" pari a 3 μT.

Dalla relazione di cui sopra si ricava dunque il valore di distanza "R'" che permette di definire il luogo geometrico dei punti che non rispettano l'obiettivo di qualità:

$$R' = 0.286 * \sqrt{S * I} \quad [m]$$

Se a "R'" si sottrae la distanza di profondità di posa dei conduttori, che nel caso in oggetto è di circa metri 0,8 si ottiene la distanza di rispetto "h" al di sopra del terreno.



**Figura 8: Illustrazione dei parametri geometrici per la definizione della DPA**

Inoltre, indicando con "d" la profondità di posa, la formula seguente consente di calcolare la fascia di rispetto a livello del suolo "R<sub>0</sub>", ovvero la distanza in orizzontale rispetto al baricentro della terna dopo la quale il valore dell'induzione magnetica a livello del suolo scende sotto i 3 μT:

$$R_0 = \sqrt{0.082 S I - d^2} \quad [m]$$

Considerando il caso peggiore, ovvero la posa di una terna di cavi ARE4H5E 3x1x800 mmq, si ottiene quanto riportato nella tabella a seguire:

<b>CORRENTE MASSIMA DELLA PORTATA DEL CAVO</b>	I	699	A
<b>DISTANZA TRA LE GENERATRICI DEL CAVO</b>	S	0,0587	m
<b>PROFONDITÀ INTERRAMENTO CAVI</b>	d	0,8	m
<b>RAGGIO CON INDUZIONE MAGNETICA SINO A 3μT</b>	R'	1,832	m
<b>DISTANZA DI RISPETTO AL DI SOPRA DEL TERRENO</b>	h	1,032	m
<b>DISTANZA ORIZZONTALE A LIVELLO DEL SUOLO DOPO LA QUALE L'INDUZIONE MAGNETICA DIMINUISCE SOTTO I 3μT</b>	R <sub>0</sub>	1,651	m
<b>DISTANZA DI PRIMA APPROSSIMAZIONE</b>	DPA	2	m

Se si considera che la profondità di posa dei cavi sarà non inferiore a 0,80 metri, il vettore R' che parte dal baricentro dei cavi in direzione verticale avrà un'estensione pari a R'=1,832 m, mentre la distanza verticale a partire dalla superficie del terreno all'interno della quale è corretto ritenere che non ci sia presenza di persone risulta pari a h = 1,032 m. Inoltre, a livello del suolo la fascia di rispetto si estende in orizzontale per una distanza R<sub>0</sub> = 1,651 m, approssimata per quanto detto sopra ad 2 m.

## 2. Scavo con due terne di cavi, tipologia ARE4H5E

Per tener conto di due o più terne nella stessa sezione di scavo si è fatto ricorso ad un modello matematico che prende in considerazione il campo magnetico generato da ogni singola terna.

Il modello, costituito secondo quanto previsto e suggerito dalla norma CEI 211-4 cap 4.2.2.3, tiene conto delle componenti spaziali dell'induzione magnetica, calcolate come somma del contributo delle correnti nei diversi conduttori:

$$B_x = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_i I_i \left[ \frac{y_i - y}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right] \quad B_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_i I_i \left[ \frac{x_i - x}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right]$$

È possibile a questo punto effettuare una semplificazione del modello che consideri il contributo non del singolo conduttore ma dell'intera terna.

Riprendendo quanto già detto in precedenza, per i cavi unipolari posati a trifoglio semplice si può ricorrere ad un'espressione approssimata del campo magnetico:

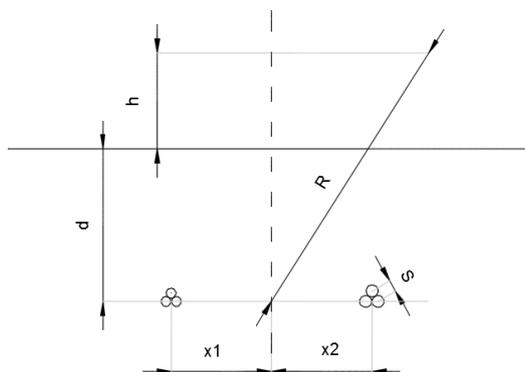
$$B = 0.1 * \sqrt{6} \frac{S * I}{R'^2} \quad [\mu T]$$

Considerata la natura vettoriale del campo magnetico, è possibile sommare i contributi generati dalle singole terne e calcolare, tramite il modello semplificato di cui prima, il valore del campo magnetico nello spazio circostante l'elettrodotto.

Fissando quindi l'asse centrale del sistema di terne come riportato in figura, il campo magnetico generato dalle due terne di elettrodotti è dato dalla seguente formula:

$$B = 0,1 * \sqrt{6} * \frac{S_1 * I_1}{(x - x_1)^2 + (y - d)^2} + 0,1 * \sqrt{6} * \frac{S_2 * I_2}{(x - x_2)^2 + (y - d)^2}$$

dove B [ $\mu T$ ] è l'induzione magnetica in un generico punto distante R [m] dal centro del sistema (baricentro delle due terne di cavi),  $S_i$  [m] è la distanza fra i conduttori adiacenti della terna  $i$ -esima, percorsi da correnti simmetriche ed equilibrate di ampiezza pari a  $I_i$  [A] (specifica della terna  $i$ -esima).



**Figura 9: Sistema di riferimento per la valutazione dei campi magnetici nel caso di due terne posate all'interno della medesima trincea**

Sono state quindi calcolate, fissando vari valori di  $h$ , le distribuzioni dell'intensità del campo magnetico su piani fuori terra paralleli al suolo, considerando la condizione di posa peggiore di due terne di cavi ARE4H5E 3x1x630 mmq.

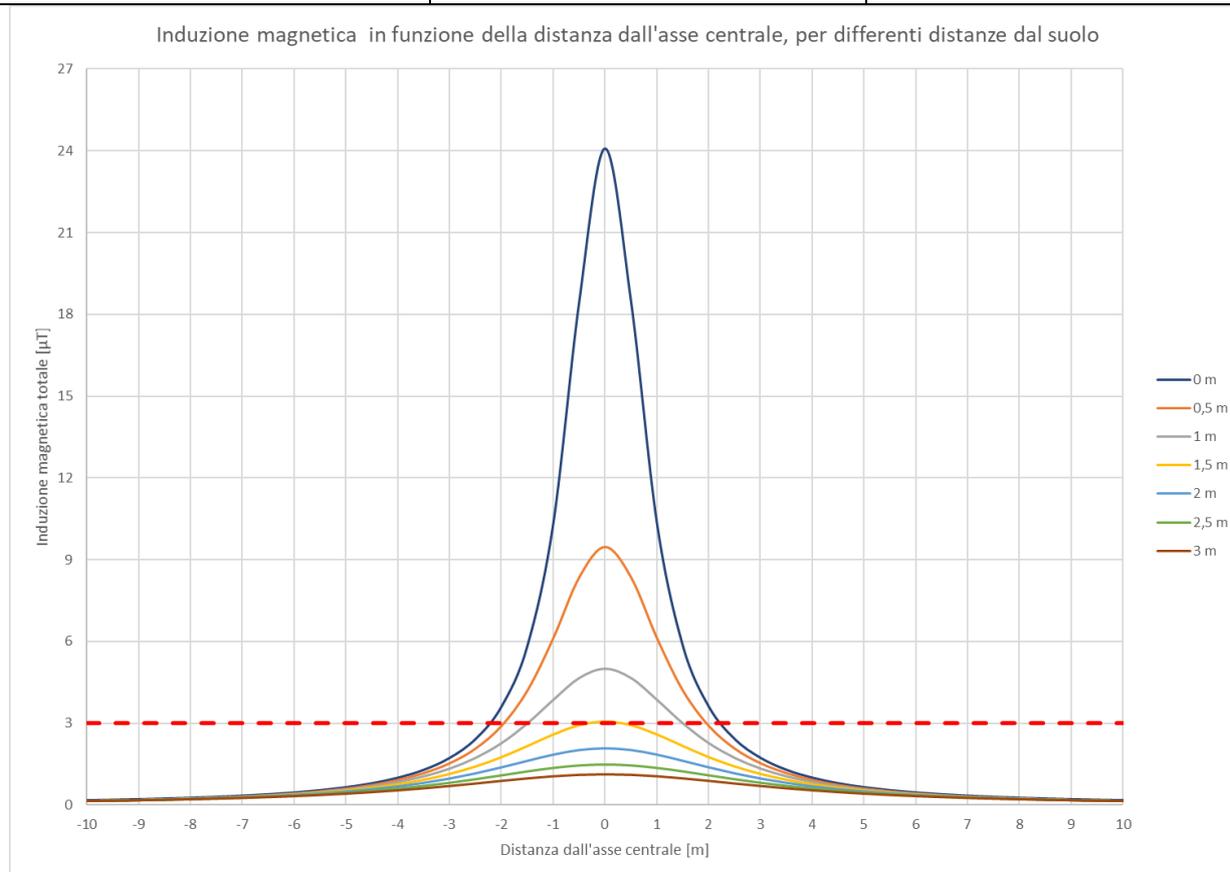
**Tabella 1 – Parametri geometrici e tecnici in ingresso considerati nella valutazione dei campi elettromagnetici generati da due terne di cavi posti nello stesso scavo.**

Profondità di posa dei cavi	0,8 m
Distanza terna 1 dall'asse y	-0,2 m
Distanza terna 2 dall'asse y	0,2 m
Sezione terne	3x1x630 mm <sup>2</sup>
Corrente cavi	620 A

La tabella che segue mostra i valori della distribuzione, con un intervallo di campionamento dei valori in ascissa (ossia della distanza dall'asse centrale) pari a 0,5 m.

**Tabella 2 - Valori di intensità del campo magnetico nel caso posa di due terne di cavi nello stesso scavo al variare della distanza dal livello del suolo e della distanza dal baricentro delle terne di cavi.**

INDUZIONE MAGNETICA TOTALE [ $\mu$ T]							
Distanza dall'asse centrale [m]	Distanza dal livello del suolo (m)						
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
-10	0,163	0,161	0,159	0,156	0,152	0,148	0,143
-9,5	0,180	0,178	0,175	0,172	0,167	0,162	0,157
-9	0,201	0,198	0,195	0,190	0,184	0,178	0,172
-8,5	0,225	0,222	0,217	0,211	0,205	0,197	0,189
-8	0,254	0,250	0,244	0,237	0,228	0,219	0,209
-7,5	0,288	0,283	0,276	0,266	0,256	0,244	0,232
-7	0,331	0,324	0,314	0,302	0,289	0,274	0,258
-6,5	0,383	0,374	0,361	0,345	0,327	0,309	0,289
-6	0,448	0,436	0,418	0,397	0,374	0,350	0,325
-5,5	0,532	0,514	0,490	0,462	0,431	0,399	0,367
-5	0,641	0,616	0,582	0,542	0,500	0,457	0,416
-4,5	0,788	0,750	0,700	0,643	0,584	0,527	0,473
-4	0,991	0,931	0,855	0,772	0,689	0,610	0,539
-3,5	1,281	1,183	1,063	0,937	0,817	0,709	0,614
-3	1,718	1,545	1,346	1,151	0,975	0,824	0,699
-2,5	2,413	2,084	1,737	1,424	1,164	0,956	0,792
-2	3,603	2,914	2,276	1,768	1,384	1,100	0,888
-1,5	5,832	4,209	2,996	2,173	1,622	1,245	0,980
-1	10,331	6,128	3,859	2,597	1,847	1,374	1,058
-0,5	18,457	8,354	4,653	2,938	2,015	1,465	1,112
0	24,076	9,463	4,991	3,072	2,078	1,498	1,131
0,5	18,457	8,354	4,653	2,938	2,015	1,465	1,112
1	10,331	6,128	3,859	2,597	1,847	1,374	1,058
1,5	5,832	4,209	2,996	2,173	1,622	1,245	0,980
2	3,603	2,914	2,276	1,768	1,384	1,100	0,888
2,5	2,413	2,084	1,737	1,424	1,164	0,956	0,792
3	1,718	1,545	1,346	1,151	0,975	0,824	0,699
3,5	1,281	1,183	1,063	0,937	0,817	0,709	0,614
4	0,991	0,931	0,855	0,772	0,689	0,610	0,539
4,5	0,788	0,750	0,700	0,643	0,584	0,527	0,473
5	0,641	0,616	0,582	0,542	0,500	0,457	0,416
5,5	0,532	0,514	0,490	0,462	0,431	0,399	0,367
6	0,448	0,436	0,418	0,397	0,374	0,350	0,325
6,5	0,383	0,374	0,361	0,345	0,327	0,309	0,289
7	0,331	0,324	0,314	0,302	0,289	0,274	0,258
7,5	0,288	0,283	0,276	0,266	0,256	0,244	0,232
8	0,254	0,250	0,244	0,237	0,228	0,219	0,209
8,5	0,225	0,222	0,217	0,211	0,205	0,197	0,189
9	0,201	0,198	0,195	0,190	0,184	0,178	0,172
9,5	0,180	0,178	0,175	0,172	0,167	0,162	0,157
10	0,163	0,161	0,159	0,156	0,152	0,148	0,143



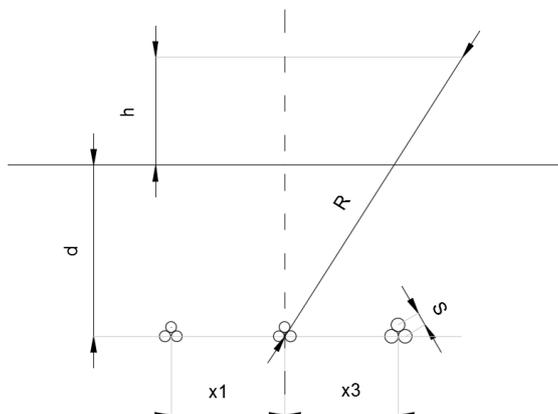
**Figura 10 - Andamento dell'intensità del campo magnetico nel caso posa di due terne di cavi nello stesso scavo al variare della distanza dal livello del suolo e della distanza dal baricentro delle terne di cavi. In rosso l'obiettivo di qualità imposto dalla norma**

Analizzando i risultati ottenuti si evidenzia:

- Distanza in verticale rispetto all'asse centrale baricentrico dei cavidotti con induzione magnetica superiore a 3 µT: 2,32m;
- Fascia di rispetto al di sopra del terreno: 1,52 m;
- Distanza di Prima Approssimazione: 2,13 m, approssimata a 3 m;

### 3. Scavo con tre terne di cavi, tipologia ARE4H5E

Analogamente a quanto visto nel paragrafo precedente, viene condotto lo studio nel caso in cui all'interno dello stesso scavo siano presenti tre terne di cavi, come evidenziato in figura.



**Figura 11: Sistema di riferimento per la valutazione dei campi magnetici nel caso di tre terne posate all'interno della medesima trincea**

Considerata quindi la disposizione spaziale delle terne, e fissando l'asse centrale del sistema in corrispondenza della mezzeria tra le terne, si può calcolare il campo magnetico generato dai tre elettrodotti attraverso la seguente formula:

$$B = 0,1 \sqrt{6} \sum_i \frac{S_i I_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

dove  $B$  [ $\mu\text{T}$ ] è l'induzione magnetica in un generico punto di coordinate  $(x, y)$  rispetto al centro del sistema (baricentro delle due terne di cavi),  $S_i$  [m] è la distanza fra i conduttori adiacenti della terna  $i$ -esima, percorsi da correnti simmetriche ed equilibrate di ampiezza pari a  $I_i$  [A] (specifica della terna  $i$ -esima). La terna  $i$ -esima è individuata dalle coordinate  $(x_i, y_i)$ .

Come nel paragrafo precedente sono state calcolate le distribuzioni dell'intensità del campo magnetico su piani fuori terra paralleli al suolo, fissando vari valori di  $h$  e considerando un caso peggiore di tre terne di cavi ARE4H5E 3x1x630 mmq.

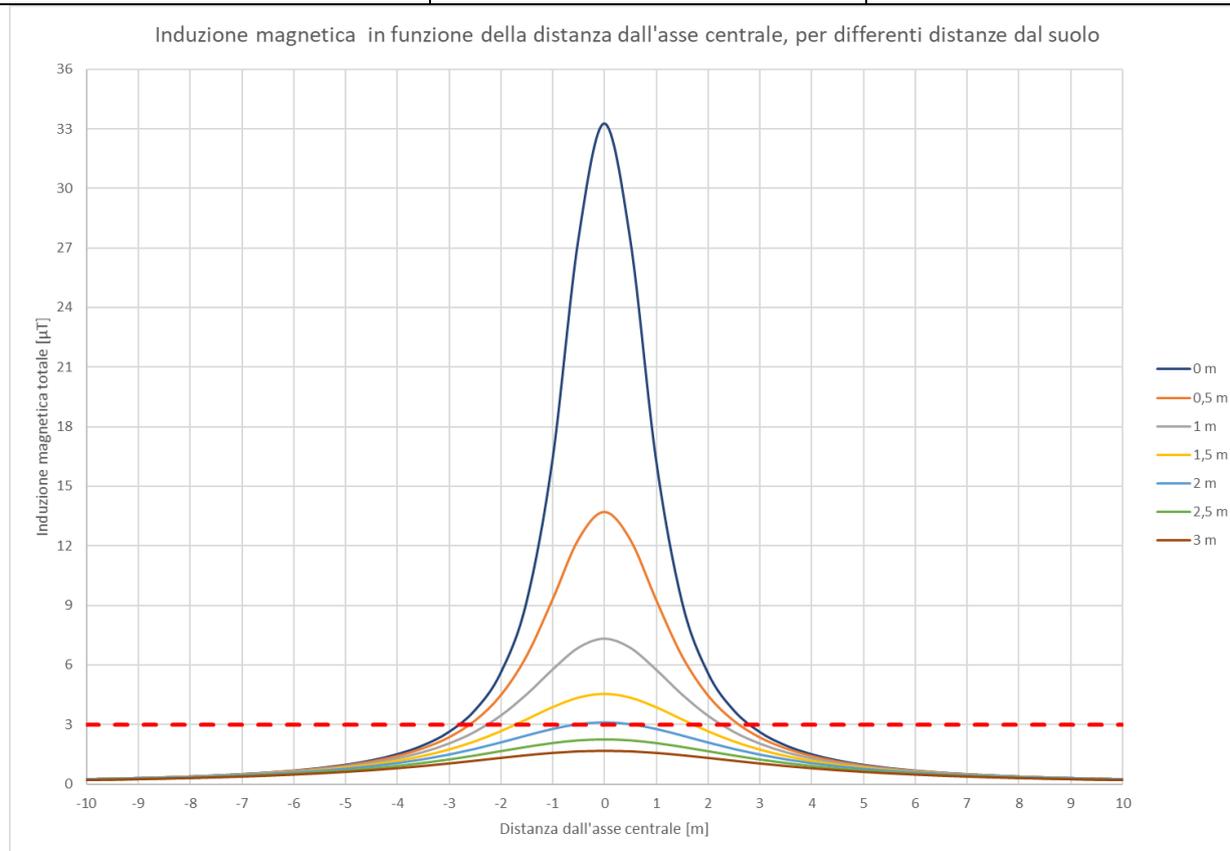
**Tabella 3 – Parametri geometrici e tecnici in ingresso considerati nella valutazione dei campi elettromagnetici generati da tre terne di cavi posti nello stesso scavo.**

Profondità di posa dei cavi	0,8 m
Distanza terna 1 dall'asse y	-0,4 m
Distanza terna 2 dall'asse y	0 m
Distanza terna 3 dall'asse y	0,4 m
Sezione terne	3x1x630 mm <sup>2</sup>
Corrente cavi	620 A

La tabella che segue mostra i valori della distribuzione, con un intervallo di campionamento dei valori in ascissa (ossia della distanza dall'asse centrale) pari a 0,5 m.

**Tabella 4 - Valori di intensità del campo magnetico nel caso posa di tre terne di cavi nello stesso scavo al variare della distanza dal livello del suolo e della distanza dal baricentro delle terne di cavi.**

INDUZIONE MAGNETICA TOTALE [ $\mu\text{T}$ ]							
Distanza dall'asse centrale [m]	Distanza dal livello del suolo (m)						
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
-10	0,245	0,242	0,239	0,234	0,228	0,222	0,215
-9,5	0,271	0,268	0,264	0,258	0,251	0,243	0,235
-9	0,302	0,298	0,293	0,286	0,277	0,268	0,258
-8,5	0,338	0,334	0,327	0,318	0,308	0,296	0,284
-8	0,382	0,376	0,367	0,356	0,343	0,329	0,314
-7,5	0,434	0,426	0,415	0,401	0,385	0,367	0,349
-7	0,498	0,487	0,473	0,455	0,434	0,412	0,388
-6,5	0,577	0,563	0,543	0,520	0,493	0,464	0,435
-6	0,676	0,657	0,630	0,599	0,563	0,526	0,489
-5,5	0,803	0,776	0,739	0,696	0,649	0,600	0,552
-5	0,969	0,930	0,878	0,817	0,753	0,688	0,625
-4,5	1,193	1,134	1,057	0,970	0,880	0,793	0,711
-4	1,503	1,410	1,293	1,165	1,038	0,918	0,810
-3,5	1,950	1,796	1,609	1,415	1,232	1,067	0,923
-3	2,626	2,352	2,040	1,738	1,469	1,240	1,050
-2,5	3,713	3,183	2,635	2,151	1,753	1,437	1,188
-2	5,601	4,463	3,451	2,665	2,080	1,650	1,331
-1,5	9,183	6,445	4,525	3,265	2,431	1,864	1,467
-1	16,325	9,279	5,779	3,879	2,760	2,053	1,582
-0,5	27,436	12,309	6,885	4,364	3,001	2,185	1,660
0	33,254	13,693	7,342	4,551	3,091	2,233	1,688
0,5	27,436	12,309	6,885	4,364	3,001	2,185	1,660
1	16,325	9,279	5,779	3,879	2,760	2,053	1,582
1,5	9,183	6,445	4,525	3,265	2,431	1,864	1,467
2	5,601	4,463	3,451	2,665	2,080	1,650	1,331
2,5	3,713	3,183	2,635	2,151	1,753	1,437	1,188
3	2,626	2,352	2,040	1,738	1,469	1,240	1,050
3,5	1,950	1,796	1,609	1,415	1,232	1,067	0,923
4	1,503	1,410	1,293	1,165	1,038	0,918	0,810
4,5	1,193	1,134	1,057	0,970	0,880	0,793	0,711
5	0,969	0,930	0,878	0,817	0,753	0,688	0,625
5,5	0,803	0,776	0,739	0,696	0,649	0,600	0,552
6	0,676	0,657	0,630	0,599	0,563	0,526	0,489
6,5	0,577	0,563	0,543	0,520	0,493	0,464	0,435
7	0,498	0,487	0,473	0,455	0,434	0,412	0,388
7,5	0,434	0,426	0,415	0,401	0,385	0,367	0,349
8	0,382	0,376	0,367	0,356	0,343	0,329	0,314
8,5	0,338	0,334	0,327	0,318	0,308	0,296	0,284
9	0,302	0,298	0,293	0,286	0,277	0,268	0,258
9,5	0,271	0,268	0,264	0,258	0,251	0,243	0,235
10	0,245	0,242	0,239	0,234	0,228	0,222	0,215



**Figura 12 - Andamento dell'intensità del campo magnetico nel caso posa di tre terne di cavi nello stesso scavo al variare della distanza dal livello del suolo e della distanza dal baricentro delle terne di cavi. In rosso l'obiettivo di qualità imposto dalla norma**

Analizzando i risultati ottenuti si evidenzia:

- Distanza in verticale rispetto all'asse centrale baricentrico dei cavidotti con induzione magnetica superiore a 3 µT: 2,85 m;
- Fascia di rispetto al di sopra del terreno: 2,05 m;
- Distanza di Prima Approssimazione: 2,83 m, approssimata a 3 m;

#### 4. Scavo con quattro terne di cavi, tipologia ARE4H5E

Analogamente a quanto visto nel paragrafo precedente, viene condotto lo studio nel caso in cui all'interno dello stesso scavo siano presenti quattro terne di cavi.

Considerata quindi la disposizione spaziale delle terne, e fissando l'asse centrale del sistema in corrispondenza della mezzeria tra le terne, si può calcolare il campo magnetico generato dai tre elettrodotti attraverso la seguente formula:

$$B = 0,1 \sqrt{6} \sum_i \frac{S_i I_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

dove B [µT] è l'induzione magnetica in un generico punto di coordinate (x,y) rispetto al centro del sistema (baricentro delle due terne di cavi),  $S_i$  [m] è la distanza fra i conduttori adiacenti della terna i-esima, percorsi da correnti simmetriche ed equilibrate di ampiezza pari a  $I_i$  [A] (specificata della terna i-esima). La terna i-esima è individuata dalle coordinate  $(x_i, y_i)$ .

In questo caso sono state calcolate le distribuzioni dell'intensità del campo magnetico su piani fuori terra paralleli al suolo, fissando vari valori di h e considerando il caso peggiore di quattro terne di cavi ARE4H5E in formazione 3x1x630 mmq.

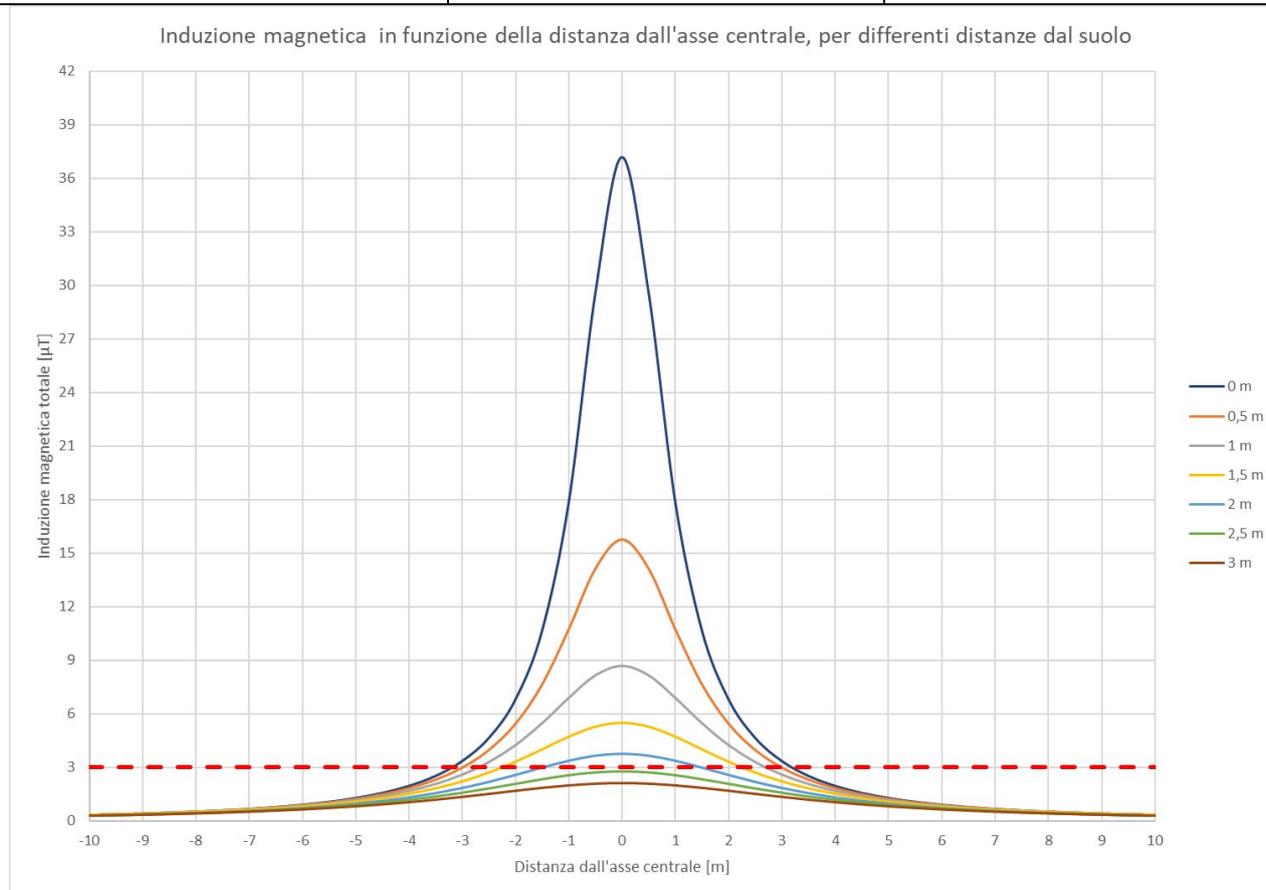
**Tabella 5 – Parametri geometrici e tecnici in ingresso considerati nella valutazione dei campi elettromagnetici generati da quattro terne di cavi posti nello stesso scavo.**

<b>Profondità di posa della terna 1 e 2</b>	0,8 m
<b>Profondità di posa della terna 3 e 4</b>	1,1 m
<b>Distanza terna 1 dall'asse y</b>	-0,2 m
<b>Distanza terna 2 dall'asse y</b>	0,2 m
<b>Distanza terna 3 dall'asse y</b>	-0,2 m
<b>Distanza terna 4 dall'asse y</b>	0,2 m
<b>Sezione terne</b>	3x1x630 mm <sup>2</sup>
<b>Corrente cavi terne</b>	620 A

La tabella che segue mostra i valori della distribuzione, con un intervallo di campionamento dei valori in ascissa (ossia della distanza dall'asse centrale) pari a 0,5 m.

**Tabella 6 - Valori di intensità del campo magnetico nel caso posa di quattro terne di cavi nello stesso scavo al variare della distanza dal livello del suolo e della distanza dal baricentro delle terne di cavi.**

INDUZIONE MAGNETICA TOTALE [ $\mu$ T]							
Distanza dall'asse centrale [m]	Distanza dal livello del suolo (m)						
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
-10	0,325	0,321	0,316	0,309	0,301	0,293	0,283
-9,5	0,360	0,355	0,348	0,341	0,331	0,321	0,310
-9	0,400	0,394	0,387	0,377	0,365	0,353	0,339
-8,5	0,448	0,441	0,431	0,419	0,405	0,389	0,373
-8	0,505	0,496	0,484	0,468	0,451	0,432	0,412
-7,5	0,574	0,562	0,546	0,527	0,505	0,481	0,456
-7	0,657	0,642	0,621	0,596	0,568	0,538	0,507
-6,5	0,760	0,740	0,712	0,680	0,644	0,606	0,567
-6	0,890	0,861	0,825	0,781	0,734	0,685	0,635
-5,5	1,054	1,015	0,964	0,905	0,842	0,778	0,715
-5	1,269	1,212	1,140	1,059	0,974	0,889	0,808
-4,5	1,555	1,471	1,366	1,251	1,134	1,021	0,915
-4	1,948	1,818	1,661	1,493	1,329	1,176	1,038
-3,5	2,507	2,295	2,050	1,801	1,568	1,359	1,178
-3	3,337	2,972	2,573	2,193	1,856	1,571	1,334
-2,5	4,635	3,958	3,281	2,686	2,198	1,809	1,502
-2	6,796	5,431	4,231	3,292	2,588	2,065	1,674
-1,5	10,651	7,637	5,459	3,990	3,001	2,320	1,838
-1	17,844	10,733	6,879	4,701	3,387	2,544	1,976
-0,5	29,569	14,126	8,142	5,262	3,669	2,701	2,069
0	37,173	15,760	8,670	5,479	3,774	2,757	2,102
0,5	29,569	14,126	8,142	5,262	3,669	2,701	2,069
1	17,844	10,733	6,879	4,701	3,387	2,544	1,976
1,5	10,651	7,637	5,459	3,990	3,001	2,320	1,838
2	6,796	5,431	4,231	3,292	2,588	2,065	1,674
2,5	4,635	3,958	3,281	2,686	2,198	1,809	1,502
3	3,337	2,972	2,573	2,193	1,856	1,571	1,334
3,5	2,507	2,295	2,050	1,801	1,568	1,359	1,178
4	1,948	1,818	1,661	1,493	1,329	1,176	1,038
4,5	1,555	1,471	1,366	1,251	1,134	1,021	0,915
5	1,269	1,212	1,140	1,059	0,974	0,889	0,808
5,5	1,054	1,015	0,964	0,905	0,842	0,778	0,715
6	0,890	0,861	0,825	0,781	0,734	0,685	0,635
6,5	0,760	0,740	0,712	0,680	0,644	0,606	0,567
7	0,657	0,642	0,621	0,596	0,568	0,538	0,507
7,5	0,574	0,562	0,546	0,527	0,505	0,481	0,456
8	0,505	0,496	0,484	0,468	0,451	0,432	0,412
8,5	0,448	0,441	0,431	0,419	0,405	0,389	0,373
9	0,400	0,394	0,387	0,377	0,365	0,353	0,339
9,5	0,360	0,355	0,348	0,341	0,331	0,321	0,310
10	0,325	0,321	0,316	0,309	0,301	0,293	0,283



**Figura 13 – Andamento dell'intensità del campo magnetico nel caso posa di quattro terne di cavi nello stesso scavo al variare della distanza dal livello del suolo e della distanza dal baricentro delle terne di cavi. In rosso l'obiettivo di qualità imposto dalla normativa di settore**

Analizzando i risultati ottenuti si evidenzia:

- Distanza in verticale rispetto all'asse centrale baricentrico dei cavidotti con induzione magnetica superiore a 3 μT (terna 1 e 2): 3,18 m;
- Distanza in verticale rispetto all'asse centrale baricentrico dei cavidotti con induzione magnetica superiore a 3 μT (terna 3 e 4): 3,48 m;
- Fascia di rispetto al di sopra del terreno: 2,38 m;
- Distanza di Prima Approssimazione: 3,20 m, approssimata a 4 m.

##### 5. Scavo con otto terne di cavi, tipologia ARE4H5E

Analogamente a quanto visto nel paragrafo precedente, viene condotto lo studio nel caso in cui all'interno dello stesso scavo siano presenti quattro terne di cavi.

Considerata quindi la disposizione spaziale delle terne, e fissando l'asse centrale del sistema in corrispondenza della mezzeria tra le terne, si può calcolare il campo magnetico generato dai tre elettrodotti attraverso la seguente formula:

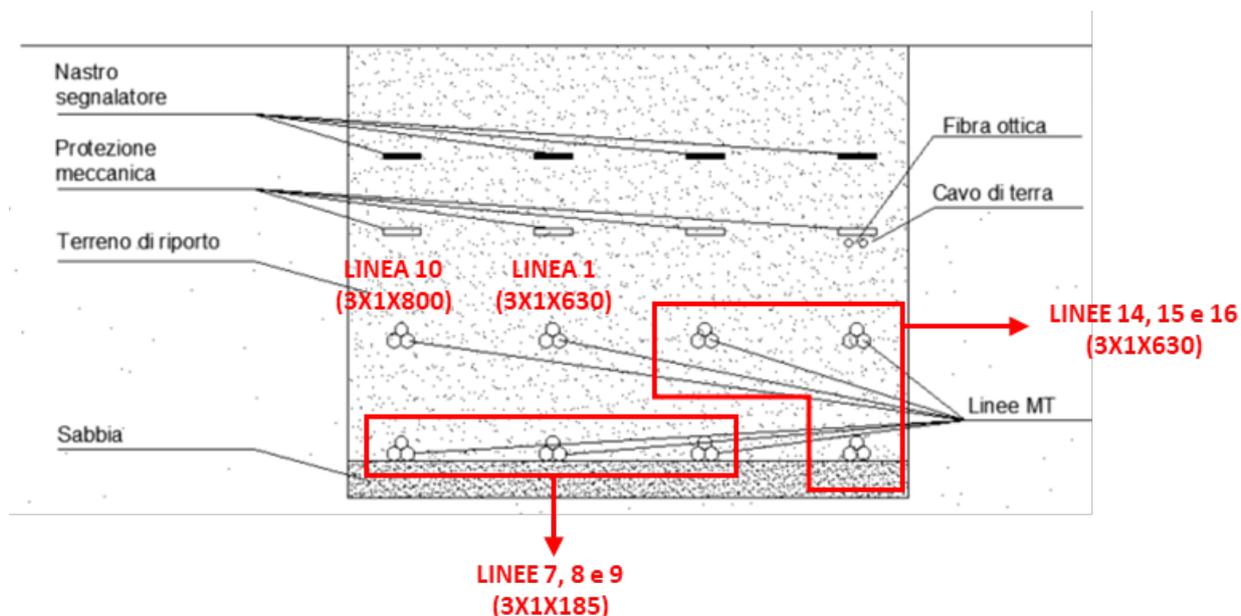
$$B = 0,1 \sqrt{6} \sum_i \frac{S_i I_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

dove B [μT] è l'induzione magnetica in un generico punto di coordinate (x,y) rispetto al centro

del sistema (baricentro delle due terne di cavi),  $S_i$  [m] è la distanza fra i conduttori adiacenti della terna  $i$ -esima, percorsi da correnti simmetriche ed equilibrate di ampiezza pari a  $I_i$  [A] (specifica della terna  $i$ -esima). La terna  $i$ -esima è individuata dalle coordinate  $(x_i, y_i)$ .

In questo caso sono state calcolate le distribuzioni dell'intensità del campo magnetico su piani fuori terra paralleli al suolo, fissando vari valori di  $h$  e considerando il caso peggiore di otto terne di cavi ARE4H5E, di cui n.4 in formazione 3x1x630 mmq, n.3 in formazione 3x1x185 mmq e n.1 in formazione 3x1x800 mmq.

In aggiunta, nel simulare il caso peggiore, in via ulteriormente cautelativa, è stato scelto di disporre ad una profondità di posa minore le terne a sezione maggiore (3x1x800 mmq e 3x1x630 mmq) e ad una profondità maggiore quelle a sezione minore (3x1x185 mmq e 3x1x630 mmq).



**Figura 14 – Ipotesi di disposizione delle otto terne nel caso peggiore con n.4 in formazione 3x1x630 mmq, n.3 in formazione 3x1x185 mmq e n.1 in formazione 3x1x800 mmq.**

**Tabella 7 – Parametri geometrici e tecnici in ingresso considerati nella valutazione dei campi elettromagnetici generati da otto terne di cavi posti nello stesso scavo.**

Profondità di posa della terna 1, 2, 3 e 4	0,8 m
Profondità di posa della terna 5, 6, 7 e 8	1,1 m
Distanza terna 1 e 5 dall'asse y	-0,6 m
Distanza terna 2 e 6 dall'asse y	-0,2 m
Distanza terna 3 e 7 dall'asse y	0,2 m
Distanza terna 4 e 8 dall'asse y	0,6 m
Sezione terna 1	3x1x800 mm <sup>2</sup>
Corrente cavi terne	699 A
Sezione terne 2, 3, 4 e 8	3x1x630 mm <sup>2</sup>
Corrente cavi terne	620 A
Sezione terne 5, 6 e 7	3x1x185 mm <sup>2</sup>



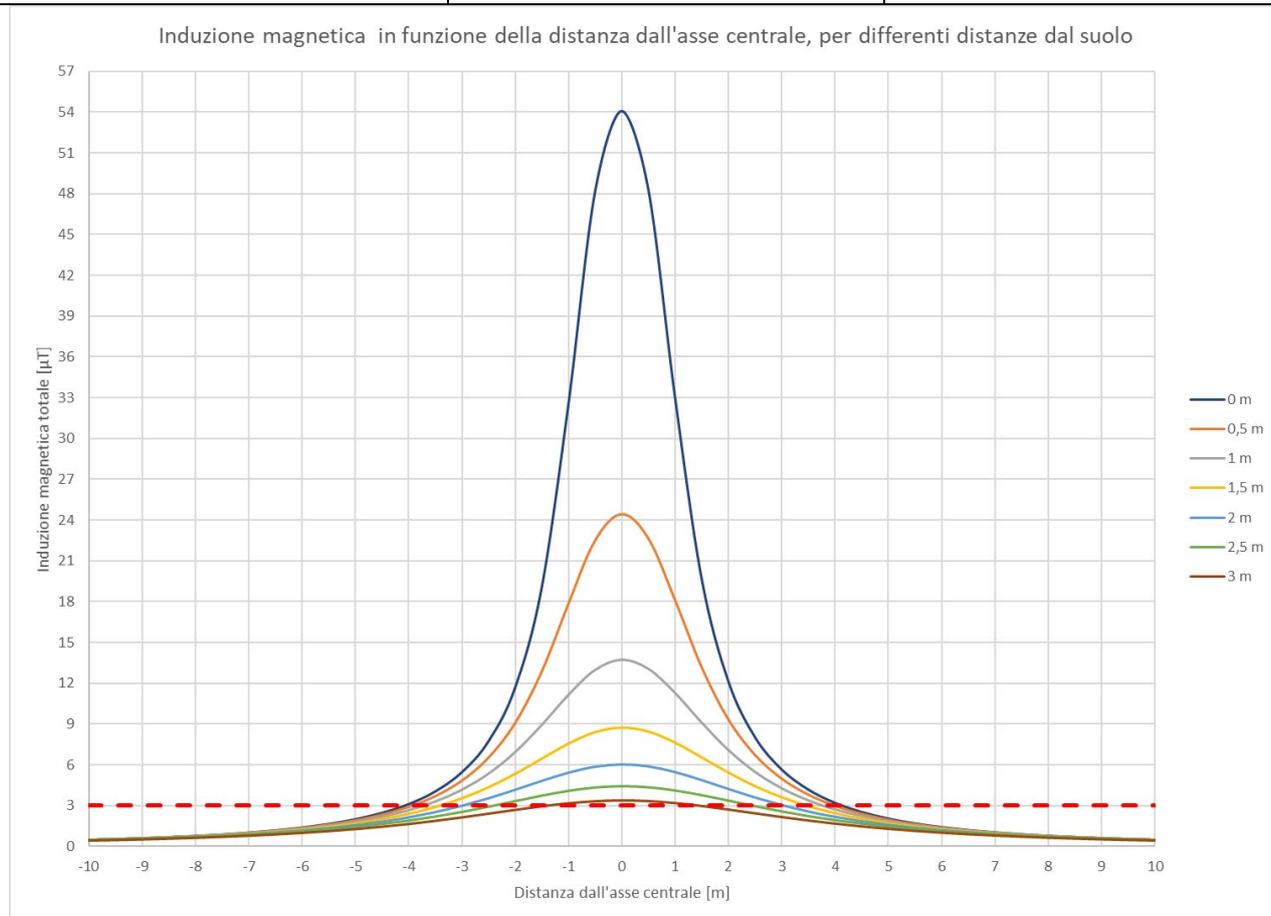
**Corrente cavi terne**

319 A

La tabella che segue mostra i valori della distribuzione, con un intervallo di campionamento dei valori in ascissa (ossia della distanza dall'asse centrale) pari a 0,5 m.

**Tabella 8 - Valori di intensità del campo magnetico nel caso posa di otto terne di cavi nello stesso scavo al variare della distanza dal livello del suolo e della distanza dal baricentro delle terne di cavi.**

INDUZIONE MAGNETICA TOTALE [ $\mu\text{T}$ ]								
Distanza dall'asse centrale [m]	Distanza dal livello del suolo (m)							
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
-10	0,511	0,505	0,497	0,487	0,475	0,462	0,447	0,432
-9,5	0,566	0,559	0,549	0,537	0,522	0,506	0,489	0,470
-9	0,630	0,622	0,609	0,594	0,577	0,557	0,536	0,513
-8,5	0,706	0,695	0,680	0,661	0,639	0,615	0,589	0,562
-8	0,797	0,783	0,763	0,740	0,712	0,682	0,651	0,618
-7,5	0,905	0,887	0,863	0,832	0,798	0,761	0,722	0,682
-7	1,038	1,014	0,982	0,943	0,899	0,852	0,803	0,754
-6,5	1,202	1,171	1,128	1,077	1,020	0,959	0,898	0,837
-6	1,409	1,365	1,307	1,239	1,164	1,086	1,008	0,931
-5,5	1,673	1,612	1,532	1,438	1,338	1,236	1,135	1,039
-5	2,019	1,930	1,816	1,686	1,549	1,414	1,284	1,162
-4,5	2,484	2,351	2,182	1,997	1,808	1,625	1,456	1,302
-4	3,130	2,919	2,663	2,390	2,124	1,876	1,654	1,458
-3,5	4,060	3,710	3,303	2,892	2,510	2,171	1,878	1,629
-3	5,470	4,845	4,169	3,532	2,978	2,512	2,128	1,814
-2,5	7,740	6,526	5,345	4,339	3,530	2,895	2,397	2,007
-2	11,675	9,068	6,923	5,323	4,157	3,304	2,673	2,197
-1,5	19,025	12,848	8,922	6,438	4,813	3,709	2,934	2,371
-1	32,464	17,819	11,128	7,542	5,417	4,063	3,153	2,514
-0,5	48,123	22,475	12,958	8,389	5,855	4,311	3,303	2,609
0	54,098	24,428	13,709	8,726	6,026	4,406	3,359	2,645
0,5	48,395	22,671	13,057	8,440	5,884	4,328	3,314	2,616
1	33,155	18,154	11,296	7,632	5,469	4,095	3,174	2,528
1,5	19,772	13,212	9,116	6,548	4,879	3,751	2,961	2,390
2	12,207	9,376	7,105	5,434	4,227	3,350	2,704	2,219
2,5	8,087	6,759	5,498	4,440	3,598	2,941	2,430	2,030
3	5,699	5,015	4,290	3,619	3,039	2,556	2,160	1,838
3,5	4,216	3,834	3,398	2,964	2,564	2,211	1,908	1,652
4	3,239	3,010	2,737	2,449	2,169	1,911	1,681	1,479
4,5	2,563	2,419	2,240	2,044	1,846	1,656	1,480	1,321
5	2,078	1,983	1,861	1,724	1,582	1,440	1,305	1,180
5,5	1,718	1,653	1,568	1,470	1,365	1,258	1,154	1,055
6	1,444	1,398	1,337	1,265	1,186	1,105	1,024	0,946
6,5	1,230	1,197	1,152	1,098	1,039	0,976	0,912	0,849
7	1,061	1,036	1,002	0,961	0,915	0,866	0,816	0,765
7,5	0,924	0,905	0,879	0,848	0,812	0,773	0,733	0,691
8	0,812	0,797	0,777	0,752	0,724	0,693	0,660	0,627
8,5	0,719	0,707	0,692	0,672	0,649	0,624	0,598	0,570
9	0,641	0,632	0,619	0,604	0,585	0,565	0,543	0,520
9,5	0,575	0,568	0,558	0,545	0,530	0,513	0,495	0,476
10	0,519	0,513	0,505	0,494	0,482	0,468	0,453	0,437



**Figura 15 – Andamento dell'intensità del campo magnetico nel caso posa di quattro terne di cavi nello stesso scavo al variare della distanza dal livello del suolo e della distanza dal baricentro delle terne di cavi. In rosso l'obiettivo di qualità imposto dalla normativa di settore**

Analizzando i risultati ottenuti si evidenzia:

- Distanza in verticale rispetto all'asse centrale baricentrico dei cavidotti con induzione magnetica superiore a 3 µT (terna 1, 2, 3 e 4): 4,05 m;
- Distanza in verticale rispetto all'asse centrale baricentrico dei cavidotti con induzione magnetica superiore a 3 µT (terna 5, 6, 7 e 8): 4,35 m;
- Fascia di rispetto al di sopra del terreno: 3,25 m;
- Distanza di Prima Approssimazione: 4,10 m, approssimata a 5 m.

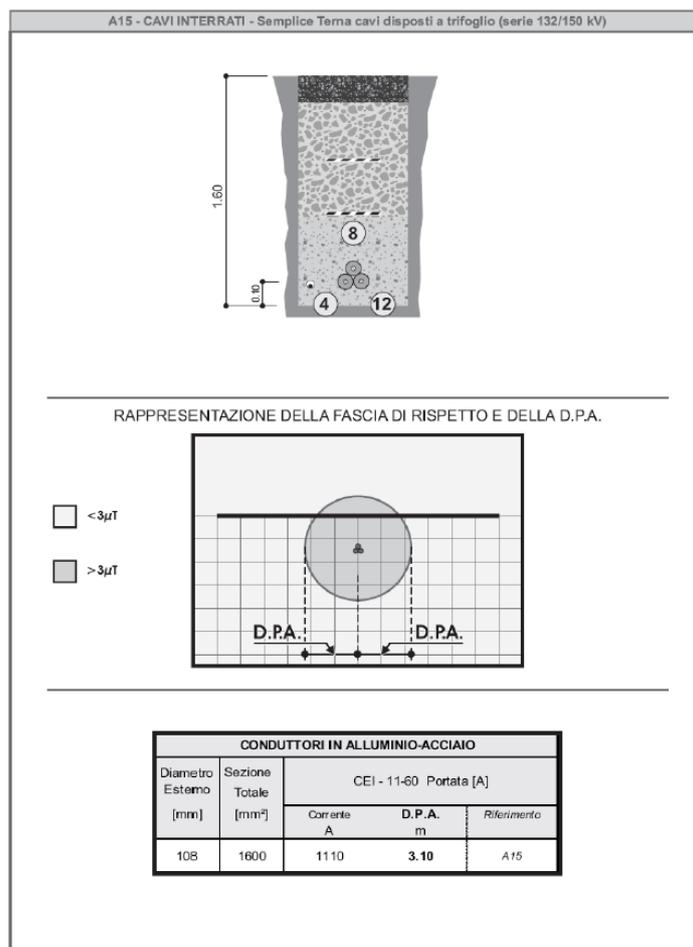
## 6. Cavidotto di connessione AT alla rete del tipo ARE4H1H5E

Analogamente ai cavidotti MT, il cavidotto di vettoriamento AT tra la sottostazione lato utente e la sottostazione Terna, necessario per collegare l'impianto di Foggia-Manfredonia alla RTN, è una potenziale sorgente di campi elettromagnetici.

Il cavidotto AT, il cui tracciato è evidenziato nella cartografia di progetto, sarà della tipologia ARE4H1H5E o similare, con tensione nominale d'isolamento U0/U 87/150 kV. Il cavo sarà direttamente interrato in formazione a trifoglio e racchiuso in uno strato di calcestruzzo magro,

per poi procedere al ripristino dello scavo con opportuno rinterro, eventualmente eseguito con materiale risultante dallo scavo stesso.

Considerate le modalità di posa del cavo, è possibile individuare la DPA del cavidotto secondo quanto presente nel documento "Linea Guida per l'applicazione del § 5.1.3 dell'allegato al DM 29.5.2008 - Distanza di prima approssimazione (DPA) da linee e cabine elettriche", dove si riporta la DPA da applicare a cavidotti in AT analoghi a quello oggetto della presente relazione.



**Figura 16 - Linee AT in cavo interrato – DPA in accordo alla "Linea Guida per l'applicazione del § 5.1.3 dell'allegato al DM 29.5.2008" di e-Distribuzione**

Si noti che la DPA di 3,10 m per parte applicata al caso generale previsto dalle Linee Guida di Enel Distribuzione considera una corrente in portata nominale di 1110 A, valore superiore rispetto a quello previsto per la connessione dell'impianto di Foggia-Manfredonia.

## 6.2 Transformation Unit

In base al DM del MATTM del 29.05.2008, cap.5.2, nel caso di cabine di tipo box o similari, la DPA, intesa come distanza da ciascuna delle pareti (tetto, pavimento e pareti laterali) della CS, va calcolata simulando una linea trifase, con cavi paralleli, percorsa dalla corrente nominale BT in uscita dal trasformatore (I) e con distanza tra le fasi pari al diametro reale (conduttore + isolante) del cavo (x) (§ 5.2.1) applicando la seguente relazione:

$$Dpa = 0.40942 * x^{0.5241} * \sqrt{I}$$

dove:

- DPA= distanza di prima approssimazione (m)
- I= corrente nominale (A)
- x= diametro dei cavi (m)

La principale sorgente di emissione delle cabine elettriche di trasformazione è costituita dal trasformatore MT/BT. Nel progetto proposto verranno impiegate cabine elettriche che vedranno installate al loro interno trasformatori con diverse taglie: 3000, 2800, 2600, 2200, 2000, 1800, 1600, 1000, 800, 6000 e 5800 kVA.

Dal momento che sono stati adottati i tipologici per cabinati da 3.000 kVA e 6.000 kVA, che presentano le stesse caratteristiche dimensionali, a vantaggio di sicurezza l'analisi verrà condotta considerando un cabinato al cui interno è presente un trasformatore da 6.000 kVA, caso più sfavorevole sia in termini di correnti al secondario sia di diametro dei cavi, estendendo i risultati anche alle altre transformation unit.

Considerando quindi per il trasformatore da 6.000 kVA un valore di I=4335,26 A e ipotizzando che i cavi sul lato BT del trasformatore stesso abbiano una formazione 3x(9x500) mm<sup>2</sup>, con diametro esterno pari a circa 37,5 mm, si ottiene una DPA, arrotondata per eccesso all'intero superiore, pari a 5 m.

Si precisa tuttavia che nel caso in questione le cabine sono posizionate all'aperto e normalmente non sono permanentemente presidiate.

### 6.3 Trasformatore Power Converter Station

Per quanto concerne l'impatto elettromagnetico nei confronti delle regolari attività umane, i componenti più impattanti costituenti la Power Converter Station, ad eccezione dei cavidotti MT trattati in precedenza, sono i trasformatori di potenza BT/MT;

Per questi ultimi si può osservare che il valore dell'induzione magnetica decresce rapidamente al crescere della distanza dal trasformatore stesso. Per distanze che variano tra 1 m e 10 m da un trasformatore in resina si può calcolare il valore del campo magnetico con la seguente formula:

$$B = 5 \frac{u_{cc}}{6} \sqrt{\frac{S_r}{630}} \left(\frac{3}{a}\right)^{2,8} [\mu T]$$

Nella quale:

- $u_{cc}$  è la tensione di cortocircuito percentuale;
- $S_r$  è potenza nominale del trasformatore (kVA);
- $a$  è la distanza dal trasformatore;

Inoltre, per un trasformatore in olio, come i trasformatori in progetto, con le stesse caratteristiche e nelle stesse condizioni di un trasformatore in resina, l'induzione magnetica risulta essere inferiore rispetto a quanto calcolabile con la precedente formula.

A vantaggio di sicurezza, l'analisi verrà condotta considerando un trasformatore in resina che presenti gli stessi parametri tecnici del trasformatore elettrico di progetto, di cui si riportano di seguito le caratteristiche principali:

- S (kVA): 2.000;
- V' (V) : 30.000;
- V'' (V) : 530;
- I'' (A): 2.181.

Ricordando che l'obiettivo di qualità previsto dal DPCM 08/07/03 è pari a 3  $\mu T$  e considerando una  $U_{cc}$  del 6%, l'applicazione della formula precedente restituisce una distanza dal trasformatore tale che il campo magnetico si riduca a 3  $\mu T$  è di 4,43 m, da cui deriva una DPA di 5 m dal trasformatore stesso.

Inoltre, tenuto conto che la sorgente analizzata è posta all'interno di un'area recintata, a distanze non inferiori a 10 m dalla recinzione stessa, non si ritiene che il trasformatore possa rappresentare un pericolo in termini di esposizione alle regolari attività umane.

## 6.4 Campo Elettromagnetico Generato Dalla SSU

La stazione di trasformazione AT/MT, che ha il compito di elevare il livello di tensione da 30 kV fino ai 150 kV della RTN, è un luogo in cui viene riscontrata l'emissione di campi elettromagnetici.

Con riferimento alla valutazione dei campi elettromagnetici generati dalla SSE 30/150 kV di innalzamento sono state individuate le seguenti possibili sorgenti in grado di generare un campo elettromagnetico significativo, determinando dunque l'opportunità di osservare la relativa distanza di prima approssimazione (DPA):

- Sbarre AT a 150 kV in aria.
- Condutture in cavo interrato a tensione nominale 30 kV.

Le altre possibili sorgenti di onde elettromagnetiche di minore rilevanza (linee BT, trasformatori MT/BT, trasformatori AT/MT, apparecchiature BT, ecc.) sono state giudicate non significative ai fini della presente valutazione, come peraltro riscontrato anche in letteratura.

Trattandosi di cabine primarie isolate in aria, il DM 29/05/08, allegato APAT, par. 5.2.2, non prevede di dover ricorrere al calcolo dei campi generati, dal momento che le DPA, e quindi le fasce di rispetto, ricadono generalmente all'interno dell'area di pertinenza della stessa cabina.

Ad ulteriore conferma di quanto appena riportato, il gestore di rete e-Distribuzione S.p.a., nel documento "Linee Guida per l'applicazione del p.5.1.3 dell'Allegato al DM 29-05-2008 - Distanza di prima approssimazione (DPA) da linee e cabine elettriche" riporta le DPA da applicare per le sottostazioni di trasformazione analoghe a quella oggetto della presente relazione.

In particolare, nell'allegato A al sopracitato documento, vengono riportate le distanze minime da garantire dal centro sbarre AT e dal centro sbarre MT rispetto al perimetro dell'area della sottostazione. Tali distanze, per sistemi con caratteristiche analoghe a quelle della sottostazione in oggetto, risultano essere:

- circa 14 m dal centro sbarre AT;
- circa 7 m dal centro sbarre MT.

## 7.0 CONCLUSIONI

Nella presente relazione è stato condotto uno studio analitico volto a valutare l'impatto elettromagnetico delle opere da realizzare e, sulla base di quanto emerso, individuare eventuali fasce di rispetto da apporre al fine di garantire il raggiungimento degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici, secondo il vigente quadro normativo. Una volta individuate le possibili sorgenti dei campi elettromagnetici, per ciascuna di esse è stata condotta una valutazione di tipo analitico, volta a determinare la consistenza dei campi generati dalle sorgenti e l'eventuale distanza di prima approssimazione (DPA).

Di seguito i principali risultati:

- Posa di una terna MT all'interno di trincee: è necessaria l'apposizione di una DPA di 2 m;
- Posa di due terne MT all'interno di trincee: è necessaria l'apposizione di una DPA di 3 m;
- Posa di tre terne MT all'interno di trincee: è necessaria l'apposizione di una DPA di 3 m;
- Posa di quattro terne MT all'interno di trincee: è necessaria l'apposizione di una DPA di 4 m;
- Posa di otto terne MT all'interno di trincee: è necessaria l'apposizione di una DPA di 5 m;
- Posa di una terna AT all'interno di trincee: è necessaria l'apposizione di una DPA di 3,1 m;
- Transformation unit da 3000 kVA, 2800 kVA, 2600 kVA, 2200 kVA, 2000 kVA, 1800 kVA, 1600 kVA, 1000 kVA, 800 kVA, 6000 kVA e 5800 kVA: è necessaria l'apposizione di una DPA di 5 m rispetto alle pareti esterne del fabbricato.
- Power conversion station: è necessaria l'apposizione di una DPA di 5 m rispetto alle pareti esterne del fabbricato.
- Stazione AT/MT: dalle sbarre MT è necessaria l'apposizione di una DPA di 7 m rispetto alle pareti esterne del fabbricato.
- Stazione AT/MT: dalle sbarre AT è necessaria l'apposizione di una DPA di 14 m rispetto alle pareti esterne del fabbricato.

Si precisa che le considerazioni e i calcoli riportati nei paragrafi precedenti riguardano esclusivamente le opere elettriche a servizio dell'impianto agrivoltaico in oggetto, escludendo quindi eventuali altre linee aeree o interrato esterne allo stesso. Considerato ciò, è possibile affermare che le opere suddette, grazie anche alle soluzioni costruttive e di localizzazione adottate (le opere dell'impianto verranno posizionate all'interno di un perimetro recintato e dunque con accesso al pubblico limitato), rispettano i limiti posti dalla L. 36/2001 e dal DPCM 8 luglio 2003 e sono quindi compatibili con l'eventuale presenza umana nella zona.

Il Progettista  
Vito Bretti