

TITLE: Relazione sui campi elettromagnetici

AVAILABLE LANGUAGE: IT

RELAZIONE SUI CAMPI ELETTROMAGNETICI
*Progetto di un impianto agrivoltaico denominato "Masala", di
 potenza pari a 48,76 MWp, e delle relative opere di
 connessione.*
*Da realizzarsi nei comuni di Ploaghe (SS) e Codrongianos
 (SS).*



File: LS16943.ENG.REL.014.00_Relazione sui campi elettromagnetici

00	15/12/2023	EMISSIONE	I.Olivieri	A.Fata	L.Spaccino												
REV.	DATE	DESCRIPTION	PREPARED	VERIFIED	APPROVED												
CLIENT VALIDATION																	
Name																	
APPROVED BY																	
CLIENT CODE																	
PLANT							GROUP			TYPE			PROGR.			REV	
L	S	1	6	9	4	3	E	N	G	R	E	L	0	1	4	0	0
CLASSIFICATION							UTILIZATION SCOPE										
For Information or For Validation							Basic Design										
<p><i>This document is property of Lightsource bp. 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 Lightsource bp.</i></p>																	

INDICE

1.0	INTRODUZIONE.....	3
2.0	QUADRO NORMATIVO E DEFINIZIONI	4
3.0	BASSE FREQUENZE.....	8
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.....	15
6.1	CAVIDOTTI	15
6.2	TRANSFORMATION UNIT	37
7.0	TUTELA DEI LAVORATORI ALL'ESPOSIZIONE AI CAMPI ELETTROMAGNETICI AI SENSI.....	38
7.1	MODULI FOTOVOLTAICI	39
7.2	INVERTER.....	40
7.3	CAVI BT	40
7.4	CAVIDOTTI 36 KV.....	40
7.5	TRANSFORMATION UNIT	43
8.0	CONCLUSIONI.....	45

1.0 INTRODUZIONE

Il presente documento costituisce la relazione sui campi elettromagnetici prodotti dall'impianto agrivoltaico di proprietà di Lightsource Renewable Energy Italy SPV 23 S.R.L., di potenza pari a 48.764,80 kWp sito nel territorio comunale di Ploaghe (SS) e Codrongianos (SS).

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 frequenza industriale.

Questo perché in tempi molto 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 fotovoltaico 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**.

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 μ 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 μ 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 μ 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.

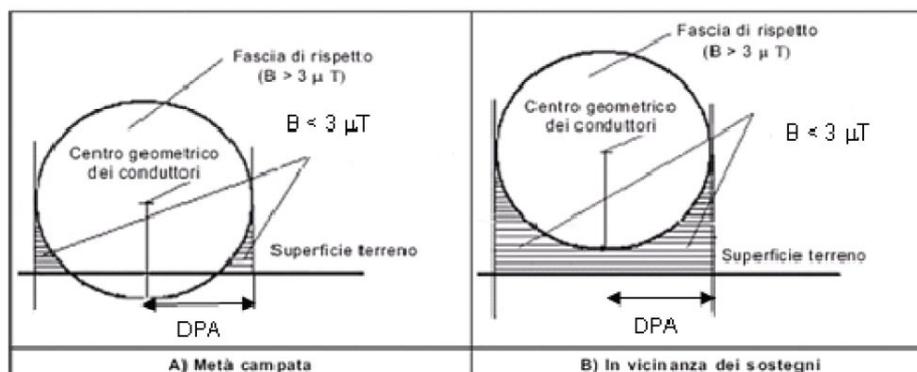
Si riportano di seguito alcune definizioni tratte dalla legge **36/2001**, dal D.P.C.M. 8 luglio 2003, e dal D.M. 29 maggio 2008, utili ai fini dell'inquadramento della materia trattata.

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 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.



Schema Fasce di rispetto e DPA in corrispondenza di metà campata e in vicinanza dei sostegni.

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 μT 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 μT 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*”, e vengono riportati nella seguente tabella:

Tabella 1 - Valori limite di esposizione ai campi elettrici e ai campi magnetici fissati dal DPCM 8/07/2003

	Campo Elettrico [kV/m]	Induzione Magnetica [μ 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 dovuto alla speciale guaina metallica schermante del cavo ed alla presenza 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 1,05 – 1,1 – 1,35 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, i quali sono più acuti nel sottosuolo in quanto il terreno è molto più conduttore dell'aria) e un rivestimento protettivo.

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 si riduce 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 è destinato ad essere collegato in antenna a 36 kV con un futuro ampliamento della Stazione Elettrica (SE) a 380/220/150 kV della RTN “Codrongianos”, come indicato nella Soluzione Tecnica Minima Generale (STMG) fornita dal gestore di rete.

Per poter connettere l’impianto alla rete di trasmissione nazionale, si eleverà la tensione dal valore di bassa tensione in uscita dai convertitori statici, pari a 800 V, ai 36.000 V della rete interna di distribuzione dell’energia, mediante l’utilizzo di trasformatori BT/36 kV, per poi provvedere infine con con il collegamento a 36 kV presso la SE Terna.

Il progetto prevede la realizzazione di due cabine di raccolta, la prima delle quali (CR1) sarà situata all’interno del sottocampo a nord-est ubicato nel comune di Ploaghe, e avrà lo scopo di raccogliere tutte le linee interne a tale area, per poi convogliarle verso l’altra cabina di raccolta (CR2). Il cavidotto di connessione si svilupperà a partire dalla CR2, che sarà posta nella porzione sud-ovest del sottocampo ricadente nel comune di Codrongianos, presso la quale saranno convogliate tutte le linee di impianto, e dove alloggeranno gli scomparti di arrivo e partenza dei cavi a 36 kV e verrà effettuata la lettura di misure e segnali di allarme provenienti dalle apparecchiature collegate al sistema di comunicazione.

Per la posa delle linee elettriche necessarie sono previste tre diverse tipologie di trincee profonde 1,2 m, e tre profonde 1,5 m, di larghezza variabile a seconda del numero di cavi interrati (cfr. elaborato “LS16943.ENG.TAV.021._ Planimetria dei cavidotti (incluse sezioni di posa)”):

- Una terna interrata: trincea larga 0,30 m e profonda 1,20 m;
- Due terne interrate nello stesso scavo: trincea larga 0,70 m e profonda 1,20 m;
- Tre terne interrate nello stesso scavo: trincea larga 1,08 m e profonda 1,20 m;
- Quattro terne interrate nello stesso scavo: trincea larga 0,70 m e profonda 1,50 m;
- Cinque terne interrate nello stesso scavo: trincea larga 1,08 m e profonda 1,50 m;
- Sei terne interrate nello stesso scavo: trincea larga 1,08 m e profonda 1,50 m.

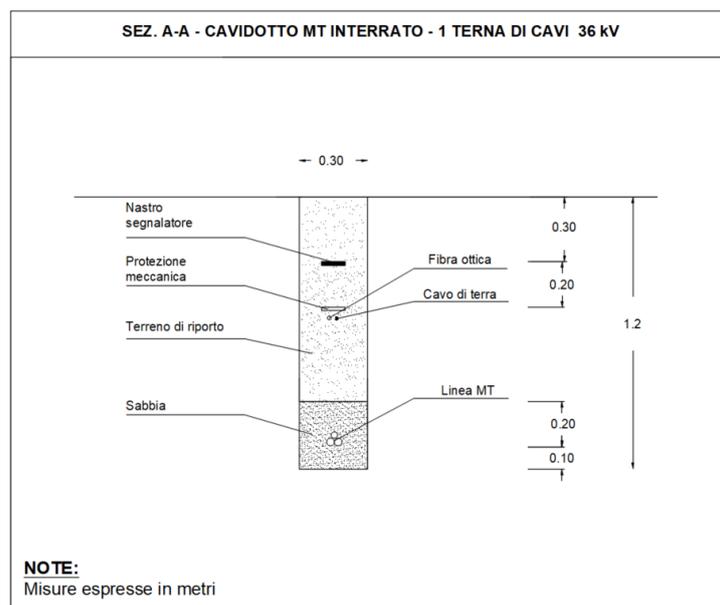


Figura 2 – Tipologico di posa per una terna di cavi interrata

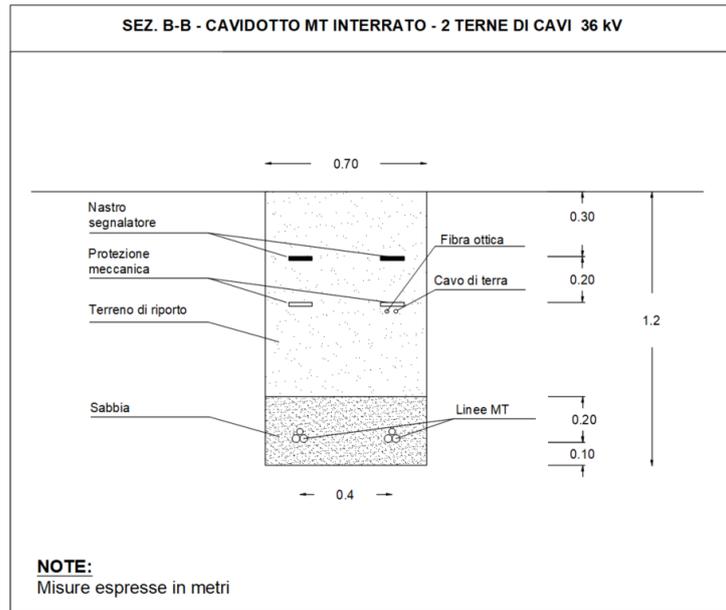


Figura 3 - Tipologico di posa per due terne di cavi interrati

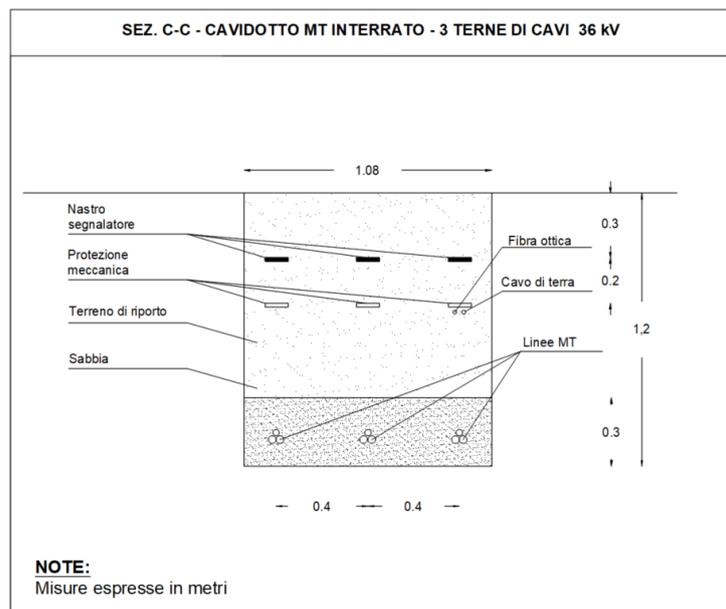


Figura 4 - Tipologico di posa per tre terne di cavi interrati

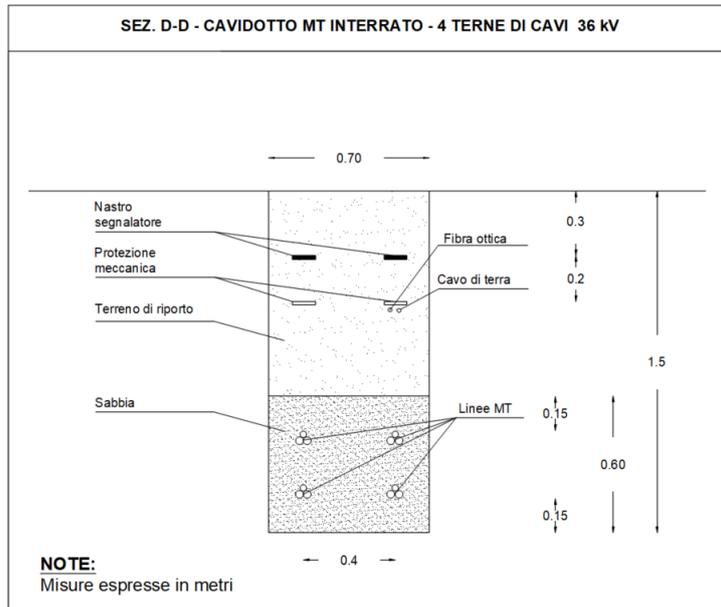


Figura 5 - Tipologico di posa per quattro terne di cavi interrati

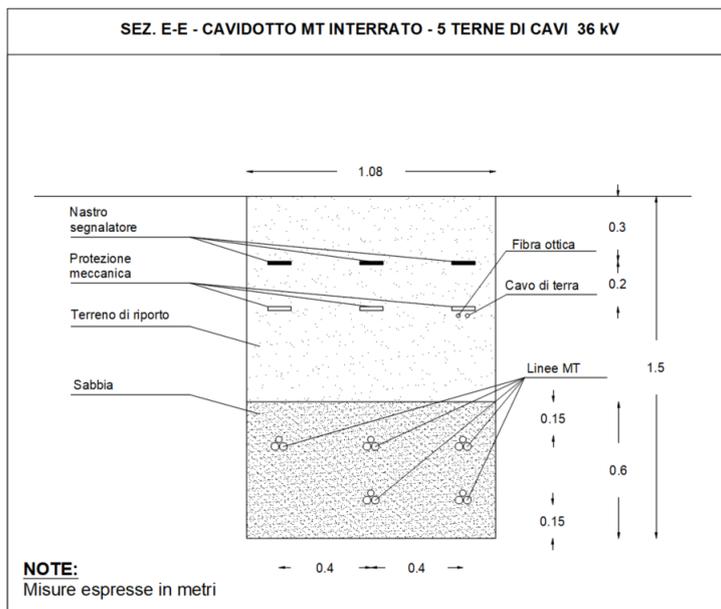


Figura 6 - Tipologico di posa per cinque terne di cavi interrati

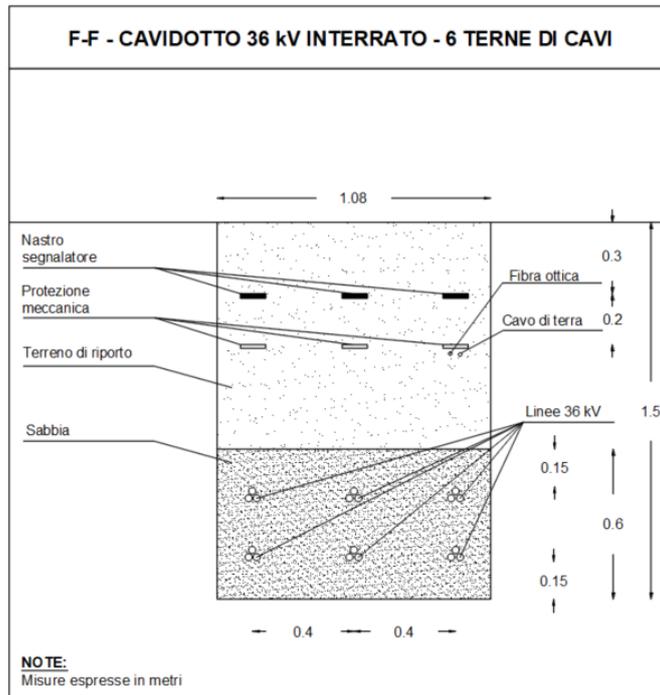


Figura 7-Tipologico di posa per sei terne di cavi interrati

Per quanto riguarda il cavidotto per il trasporto dell'energia tra le transformation unit e le cabine di raccolta verranno impiegati cavi unipolari in alluminio del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV con sezioni da 120, 185 e 630 mmq (cfr. elaborato "LS16943.ENG.TAV.025._Schema elettrico unifilare-Impianto FV").

Per la connessione è previsto l'impiego di una linea in cavo interrato a 36 kV della tipologia ARE4H5EE da 20,8/36 kV con sezione di 630 mmq, costituita da due terne di cavi in parallelo (cfr. elaborato "LS16943.ENG.TAV.038._Schema elettrico unifilare - Opere di rete").

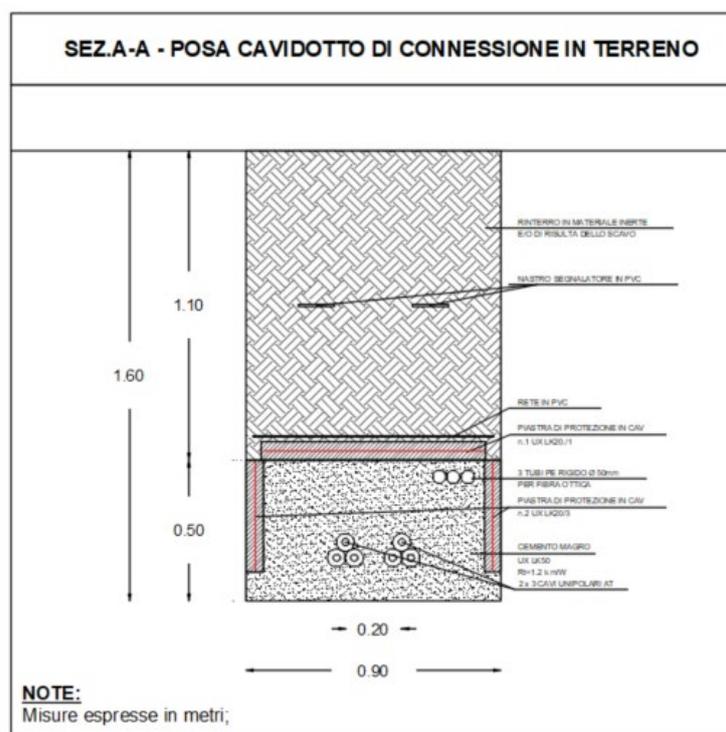


Figura 8 - Tipologico di posa in terreno per il cavidotto di connessione

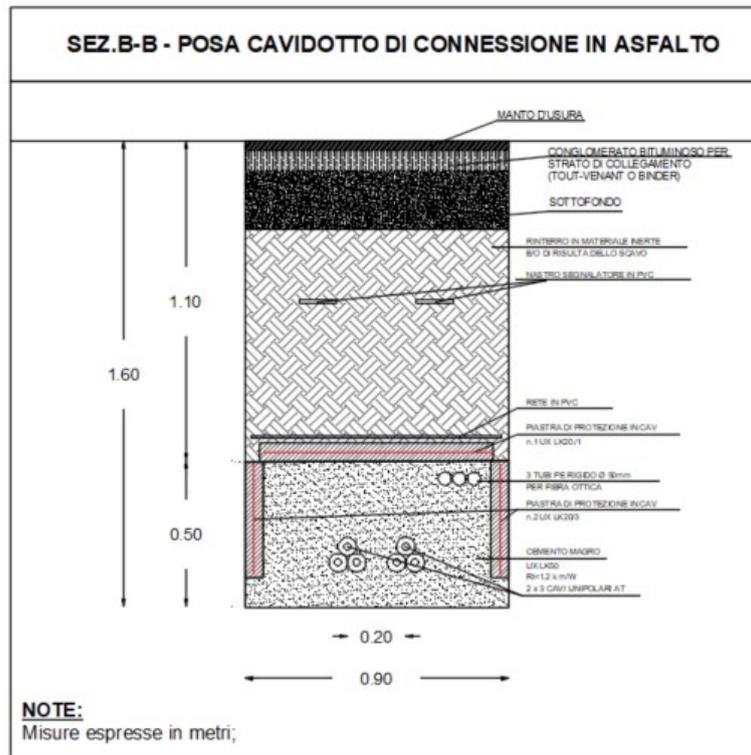


Figura 9 - Tipologico di posa in asfalto per il cavidotto di connessione

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, che per il progetto in esame saranno le seguenti:

1. Scavo con una sola terna di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV;
2. Scavo con due terne di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV;
3. Scavo con tre terne di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV;
4. Scavo con quattro terne di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV;
5. Scavo con cinque terne di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV;
6. Scavo con sei terne di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV.

Di seguito vengono riportati i risultati delle elaborazioni eseguite per determinare la DPA relativa alle linee interrate di progetto. 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. Si precisa che nelle valutazioni che seguono non sono stati presi in considerazione gli effetti dovuti alla presenza di eventuali linee elettriche interrate o aeree già in esercizio non facenti parte dell'impianto di progetto.

1. Scavo con una sola terna di cavi, tipologia ARE4H5EE da 20,8/36 kV

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 1,1 m

si ottiene la distanza di rispetto “h” al di sopra del terreno.

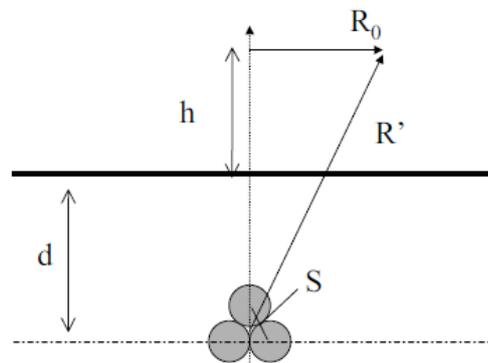


Figura 10: Illustrazione dei parametri geometrici per la definizione della DPA

Inoltre, indicando con “d” la profondità di posa, la formula seguente consente di calcolare la fascia di rispetto a livello del suolo “R₀”, 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:

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

Considerando l’unico caso previsto per il progetto in esame, ovvero la posa di una terna di cavi ARE4H5EE da 20,8/36 kV 3x1x630 mmq, si ottiene quanto riportato nella tabella a seguire.

CORRENTE MASSIMA DELLA PORTATA DEL CAVO	I	620	A
DISTANZA TRA LE GENERATRICI DEL CAVO	S	0,0602	m
PROFONDITÀ INTERRAMENTO CAVI	d	1,1	m
RAGGIO CON INDUZIONE MAGNETICA SINO A 3μT	R'	1,73	m
DISTANZA DI RISPETTO AL DI SOPRA DEL TERRENO	h	0,65	m
DISTANZA ORIZZONTALE A LIVELLO DEL SUOLO DOPO LA QUALE L'INDUZIONE MAGNETICA DIMINUISCE SOTTO I 3μT	R ₀	1,36	m
DISTANZA DI PRIMA APPROSSIMAZIONE	DPA	2	m

Se si considera che la profondità di posa dei cavi sarà non inferiore a 1,1 m, il vettore R' che parte dal baricentro dei cavi in direzione verticale avrà un'estensione pari a R'=1,73 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 = 0,65 m. Inoltre, a livello del suolo la fascia di rispetto si estende in orizzontale per una distanza R₀ = 1,36 m, approssimata per quanto detto sopra ad 2 m.

2. Scavo con due terne di cavi, tipologia ARE4H5EE da 20,8/36 kV

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 [μT] 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).

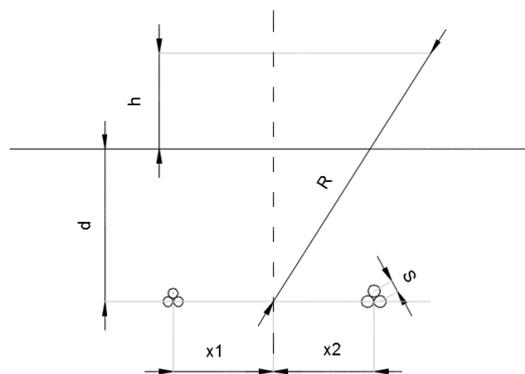


Figura 11 - Sistema di riferimento per la valutazione dei campi magnetici nel caso di due terne posate all'interno della medesima trincea

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 ARE4H5EE da 20,8/36 kV in formazione 3x1x185 mmq.

Tabella 2 – 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	1,1 m
Distanza terna 1 dall'asse y	-0,2 m
Distanza terna 2 dall'asse y	0,2 m
Sezione terne	3x1x185 mm ²
Corrente cavi	320 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 3 - 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 [μT]							
Distanza dall'asse centrale [m]	Distanza dal livello del suolo (m)						
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
-10	0,071	0,070	0,069	0,067	0,066	0,064	0,062
-9,5	0,079	0,077	0,076	0,074	0,072	0,070	0,067
-9	0,087	0,086	0,084	0,082	0,079	0,076	0,073
-8,5	0,098	0,096	0,094	0,091	0,088	0,084	0,081
-8	0,110	0,108	0,105	0,102	0,098	0,093	0,089
-7,5	0,125	0,122	0,119	0,114	0,109	0,104	0,098
-7	0,143	0,140	0,135	0,129	0,123	0,116	0,109
-6,5	0,166	0,161	0,154	0,147	0,139	0,130	0,122
-6	0,194	0,187	0,178	0,168	0,158	0,147	0,136
-5,5	0,229	0,220	0,208	0,194	0,180	0,166	0,153
-5	0,275	0,262	0,245	0,227	0,208	0,189	0,172
-4,5	0,336	0,316	0,292	0,267	0,241	0,217	0,194
-4	0,420	0,389	0,353	0,316	0,281	0,248	0,219
-3,5	0,538	0,488	0,433	0,379	0,329	0,285	0,247
-3	0,710	0,626	0,538	0,457	0,387	0,327	0,278
-2,5	0,975	0,822	0,677	0,553	0,453	0,374	0,311
-2	1,400	1,104	0,857	0,668	0,528	0,423	0,345
-1,5	2,114	1,503	1,080	0,797	0,605	0,472	0,376
-1	3,295	2,019	1,325	0,923	0,675	0,513	0,402
-0,5	4,873	2,532	1,530	1,019	0,726	0,542	0,420
0	5,744	2,762	1,613	1,056	0,744	0,552	0,426
0,5	4,873	2,532	1,530	1,019	0,726	0,542	0,420
1	3,295	2,019	1,325	0,923	0,675	0,513	0,402
1,5	2,114	1,503	1,080	0,797	0,605	0,472	0,376
2	1,400	1,104	0,857	0,668	0,528	0,423	0,345
2,5	0,975	0,822	0,677	0,553	0,453	0,374	0,311
3	0,710	0,626	0,538	0,457	0,387	0,327	0,278
3,5	0,538	0,488	0,433	0,379	0,329	0,285	0,247
4	0,420	0,389	0,353	0,316	0,281	0,248	0,219
4,5	0,336	0,316	0,292	0,267	0,241	0,217	0,194
5	0,275	0,262	0,245	0,227	0,208	0,189	0,172
5,5	0,229	0,220	0,208	0,194	0,180	0,166	0,153
6	0,194	0,187	0,178	0,168	0,158	0,147	0,136
6,5	0,166	0,161	0,154	0,147	0,139	0,130	0,122
7	0,143	0,140	0,135	0,129	0,123	0,116	0,109
7,5	0,125	0,122	0,119	0,114	0,109	0,104	0,098
8	0,110	0,108	0,105	0,102	0,098	0,093	0,089
8,5	0,098	0,096	0,094	0,091	0,088	0,084	0,081
9	0,087	0,086	0,084	0,082	0,079	0,076	0,073
9,5	0,079	0,077	0,076	0,074	0,072	0,070	0,067
10	0,071	0,070	0,069	0,067	0,066	0,064	0,062

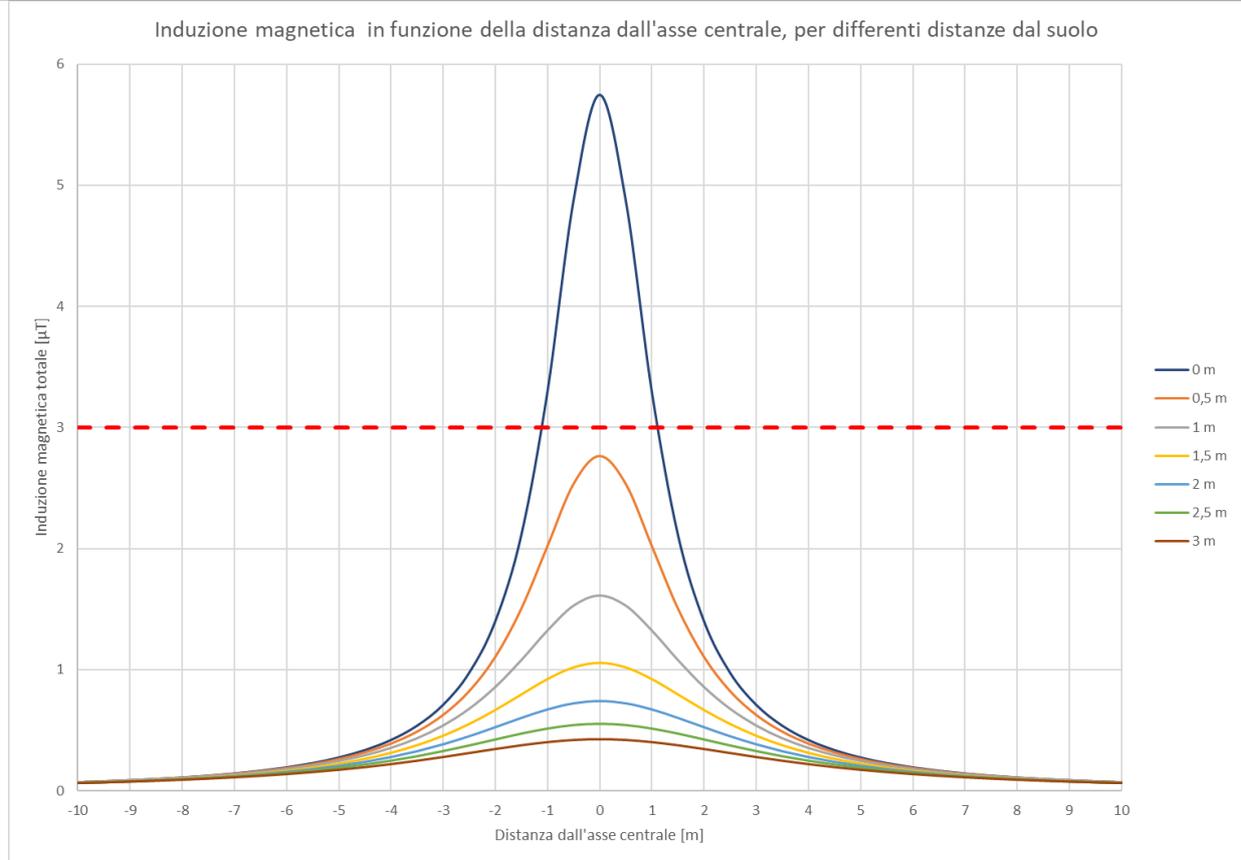


Figura 12 - Andamento dell'intensità del campo magnetico nel caso posa di due terne di cavi nello stesso scavo al variare della distanza dal livello del suolo e della distanza dal baricentro delle terne di cavi. In rosso l'obiettivo di qualità imposto dalla norma

Analizzando i risultati ottenuti si evidenzia:

- Distanza in verticale rispetto all'asse centrale baricentrico dei cavidotti con induzione magnetica superiore a 3 μT : 1,56 m;
- Fascia di rispetto al di sopra del terreno: 0,46 m;
- Distanza di Prima Approssimazione: 1,12 m, approssimata a 2 m.

3. Scavo con tre terne di cavi, tipologia ARE4H5EE da 20,8/36 kV

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.

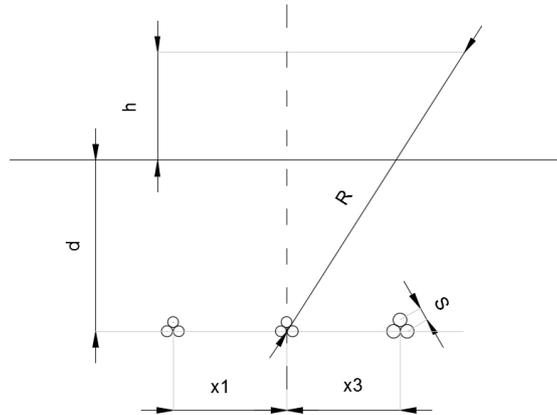


Figura 13 - Sistema di riferimento per la valutazione dei campi magnetici nel caso di tre terne posate all'interno della medesima trincea

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 [μ T] è l'induzione magnetica in un generico punto di coordinate (x,y) rispetto al centro del sistema (baricentro delle tre 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) .

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 il caso peggiore di tre terne di cavi ARE4H5EE da 20,8/36 kV, di cui n.1 in formazione 3x1x120 mmq e n.2 in formazione 3x1x185 mmq.

Tabella 4 – Parametri geometrici e tecnici in ingresso considerati nella valutazione dei campi elettromagnetici generati da tre terna di cavi posti nello stesso scavo.

Profondità di posa dei cavi	1,1 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 terna 1	3x1x120 mm ²
Corrente cavi terna 1	253 A
Sezione terna 2 e 3	3x1x185 mm ²
Corrente cavi terna 2 e 3	320 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 5 - 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 [μT]							
Distanza dall'asse centrale [m]	Distanza dal livello del suolo (m)						
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
-10	0,097	0,096	0,094	0,092	0,090	0,087	0,084
-9,5	0,108	0,106	0,104	0,102	0,099	0,095	0,092
-9	0,120	0,118	0,115	0,112	0,109	0,105	0,101
-8,5	0,134	0,132	0,129	0,125	0,120	0,116	0,111
-8	0,151	0,148	0,144	0,139	0,134	0,128	0,122
-7,5	0,171	0,168	0,162	0,156	0,150	0,142	0,135
-7	0,196	0,191	0,184	0,177	0,168	0,159	0,150
-6,5	0,227	0,220	0,211	0,201	0,190	0,178	0,167
-6	0,265	0,256	0,244	0,230	0,216	0,201	0,186
-5,5	0,313	0,300	0,284	0,266	0,247	0,228	0,209
-5	0,377	0,358	0,335	0,310	0,285	0,259	0,235
-4,5	0,460	0,433	0,400	0,365	0,330	0,296	0,266
-4	0,575	0,532	0,483	0,433	0,384	0,340	0,300
-3,5	0,736	0,667	0,592	0,518	0,450	0,390	0,338
-3	0,973	0,856	0,736	0,625	0,528	0,448	0,381
-2,5	1,337	1,124	0,925	0,756	0,619	0,511	0,426
-2	1,924	1,509	1,169	0,912	0,720	0,578	0,472
-1,5	2,904	2,048	1,470	1,085	0,825	0,644	0,515
-1	4,486	2,732	1,796	1,256	0,921	0,702	0,551
-0,5	6,461	3,399	2,072	1,387	0,991	0,742	0,576
0	7,569	3,720	2,194	1,442	1,019	0,758	0,585
0,5	6,745	3,480	2,103	1,401	0,998	0,746	0,578
1	4,767	2,838	1,842	1,278	0,933	0,709	0,555
1,5	3,084	2,139	1,516	1,111	0,840	0,653	0,521
2	2,031	1,575	1,209	0,936	0,735	0,588	0,478
2,5	1,402	1,170	0,956	0,776	0,633	0,521	0,432
3	1,015	0,888	0,759	0,641	0,540	0,456	0,387
3,5	0,764	0,690	0,610	0,532	0,460	0,398	0,344
4	0,594	0,549	0,497	0,444	0,393	0,346	0,305
4,5	0,474	0,445	0,410	0,373	0,337	0,302	0,270
5	0,387	0,367	0,343	0,317	0,290	0,264	0,239
5,5	0,321	0,308	0,291	0,272	0,252	0,232	0,213
6	0,271	0,261	0,249	0,235	0,220	0,205	0,189
6,5	0,232	0,224	0,215	0,205	0,193	0,181	0,169
7	0,200	0,195	0,188	0,180	0,171	0,162	0,152
7,5	0,175	0,171	0,165	0,159	0,152	0,145	0,137
8	0,154	0,151	0,146	0,141	0,136	0,130	0,124
8,5	0,136	0,134	0,131	0,127	0,122	0,117	0,112
9	0,122	0,120	0,117	0,114	0,110	0,106	0,102
9,5	0,109	0,108	0,106	0,103	0,100	0,097	0,093
10	0,099	0,097	0,096	0,094	0,091	0,088	0,085

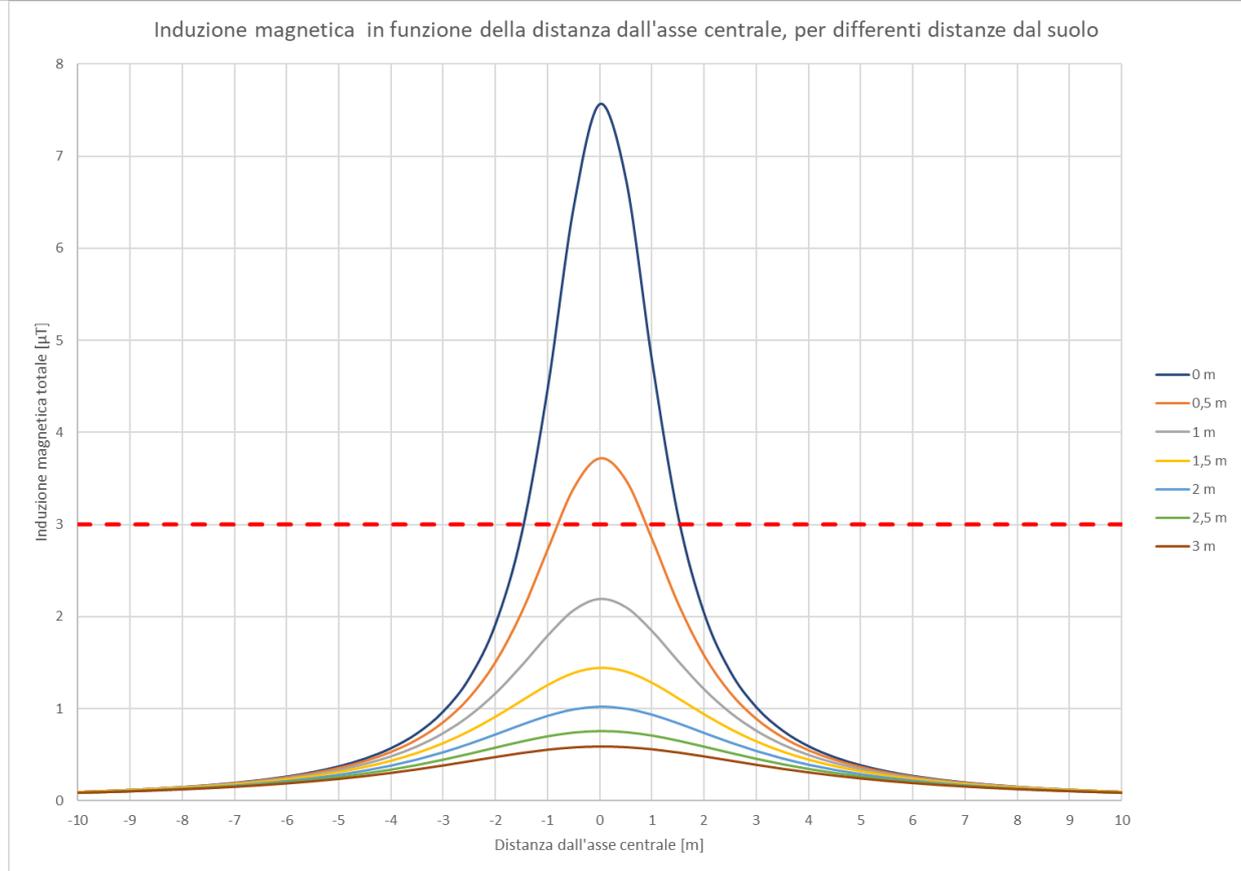


Figura 14 - Andamento dell'intensità del campo magnetico nel caso posa di tre terne di cavi nello stesso scavo al variare della distanza dal livello del suolo e della distanza dal baricentro delle terne di cavi. In rosso l'obiettivo di qualità imposto dalla norma

Analizzando i risultati ottenuti si evidenzia:

- Distanza in verticale rispetto all'asse centrale baricentrico dei cavidotti con induzione magnetica superiore a 3 μT : 1,84 m;
- Fascia di rispetto al di sopra del terreno: 0,74 m;
- Distanza di Prima Approssimazione: 1,47 m, approssimata a 2 m;

4. Scavo con quattro terne di cavi, tipologia ARE4H5EE da 20,8/36 kV

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 quattro 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 [μ T] è l'induzione magnetica in un generico punto di coordinate (x,y) rispetto al centro del sistema (baricentro delle quattro 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 ARE4H5EE da 20,8/36 kV, di cui n.1 in formazione 3x1x120 mmq, n.2 in formazione 3x1x185 mmq e n.1 in formazione 3x1x630 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 (3x1x630 mmq e 3x1x185 mmq) e ad una profondità maggiore quelle a sezione minore (3x1x120 mmq e 3x1x185 mmq), coerentemente con lo sviluppo del cavidotto di impianto e la disposizione delle singole linee.

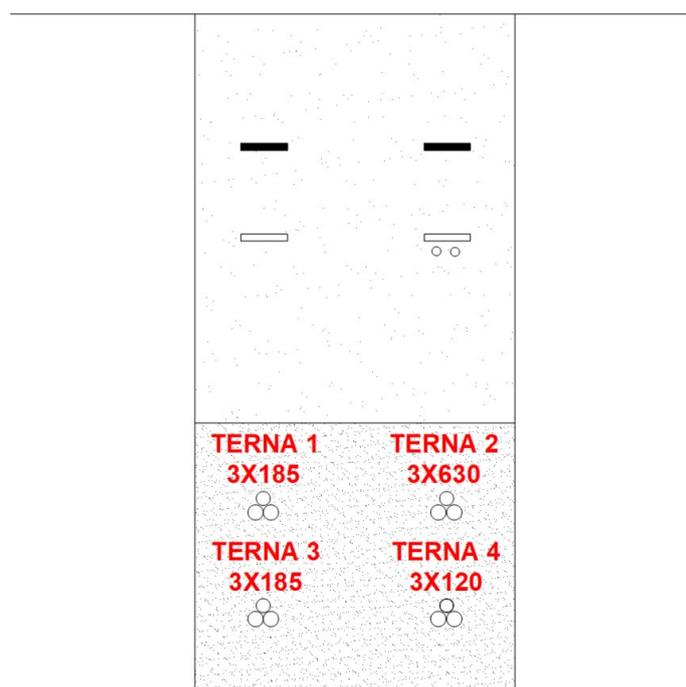


Figura 15 - Ipotesi di disposizione delle quattro terne nel caso peggiore con n.1 in formazione 3x1x120 mmq, n.2 in formazione 3x1x185 mmq e n.1 in formazione 3x1x630 mmq

Tabella 6 – Parametri geometrici e tecnici in ingresso considerati nella valutazione dei campi elettromagnetici generati da quattro terne di cavi posti nello stesso scavo.

Profondità di posa della terna 1 e 2	1,05 m
Profondità di posa della terna 3 e 4	1,35 m
Distanza terna 1 dall'asse y	-0,2 m
Distanza terna 2 dall'asse y	0,2 m
Distanza terna 3 dall'asse y	-0,2 m
Distanza terna 4 dall'asse y	0,2 m
Sezione terna 1 e 3	3x1x185 mm ²
Corrente cavi terna 1 e 3	320 A
Sezione terna 2	3x1x630 mm ²
Corrente cavi terna 2	620 A
Sezione terna 4	3x1x120 mm ²
Corrente cavi terna 4	253 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 7 - 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 [μT]							
Distanza dall'asse centrale [m]	Distanza dal livello del suolo (m)						
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
-10	0,186	0,184	0,180	0,176	0,172	0,167	0,161
-9,5	0,206	0,203	0,199	0,194	0,188	0,182	0,176
-9	0,229	0,225	0,220	0,214	0,208	0,200	0,192
-8,5	0,256	0,251	0,245	0,238	0,230	0,220	0,211
-8	0,288	0,282	0,275	0,265	0,255	0,244	0,232
-7,5	0,327	0,319	0,309	0,298	0,285	0,271	0,257
-7	0,374	0,364	0,351	0,336	0,320	0,302	0,285
-6,5	0,431	0,418	0,401	0,382	0,361	0,339	0,317
-6	0,503	0,485	0,463	0,437	0,410	0,382	0,354
-5,5	0,594	0,569	0,539	0,504	0,468	0,432	0,397
-5	0,712	0,676	0,633	0,586	0,538	0,491	0,446
-4,5	0,868	0,815	0,754	0,688	0,623	0,560	0,503
-4	1,079	0,999	0,908	0,815	0,724	0,641	0,567
-3,5	1,375	1,248	1,109	0,972	0,847	0,735	0,639
-3	1,804	1,591	1,372	1,169	0,992	0,843	0,718
-2,5	2,454	2,075	1,718	1,411	1,161	0,961	0,803
-2	3,482	2,766	2,165	1,700	1,350	1,088	0,889
-1,5	5,174	3,737	2,719	2,024	1,547	1,212	0,971
-1	7,946	5,001	3,334	2,347	1,729	1,321	1,040
-0,5	11,802	6,317	3,876	2,604	1,865	1,399	1,088
0	14,529	7,034	4,135	2,718	1,923	1,431	1,107
0,5	12,893	6,599	3,976	2,648	1,886	1,411	1,095
1	8,861	5,346	3,480	2,417	1,766	1,342	1,053
1,5	5,708	4,012	2,861	2,101	1,591	1,238	0,988
2	3,784	2,958	2,282	1,771	1,394	1,116	0,908
2,5	2,634	2,206	1,807	1,471	1,201	0,989	0,822
3	1,917	1,680	1,439	1,217	1,027	0,867	0,736
3,5	1,450	1,310	1,159	1,011	0,876	0,757	0,655
4	1,131	1,044	0,946	0,845	0,748	0,660	0,581
4,5	0,905	0,849	0,782	0,712	0,642	0,576	0,515
5	0,740	0,702	0,656	0,606	0,555	0,505	0,457
5,5	0,615	0,589	0,556	0,520	0,482	0,443	0,406
6	0,520	0,501	0,477	0,450	0,421	0,391	0,362
6,5	0,444	0,430	0,413	0,392	0,370	0,347	0,324
7	0,384	0,374	0,360	0,345	0,327	0,309	0,291
7,5	0,336	0,327	0,317	0,305	0,291	0,277	0,262
8	0,295	0,289	0,281	0,271	0,261	0,249	0,237
8,5	0,262	0,257	0,251	0,243	0,234	0,225	0,215
9	0,234	0,230	0,225	0,219	0,212	0,204	0,196
9,5	0,210	0,207	0,203	0,198	0,192	0,186	0,179
10	0,190	0,187	0,184	0,180	0,175	0,170	0,164

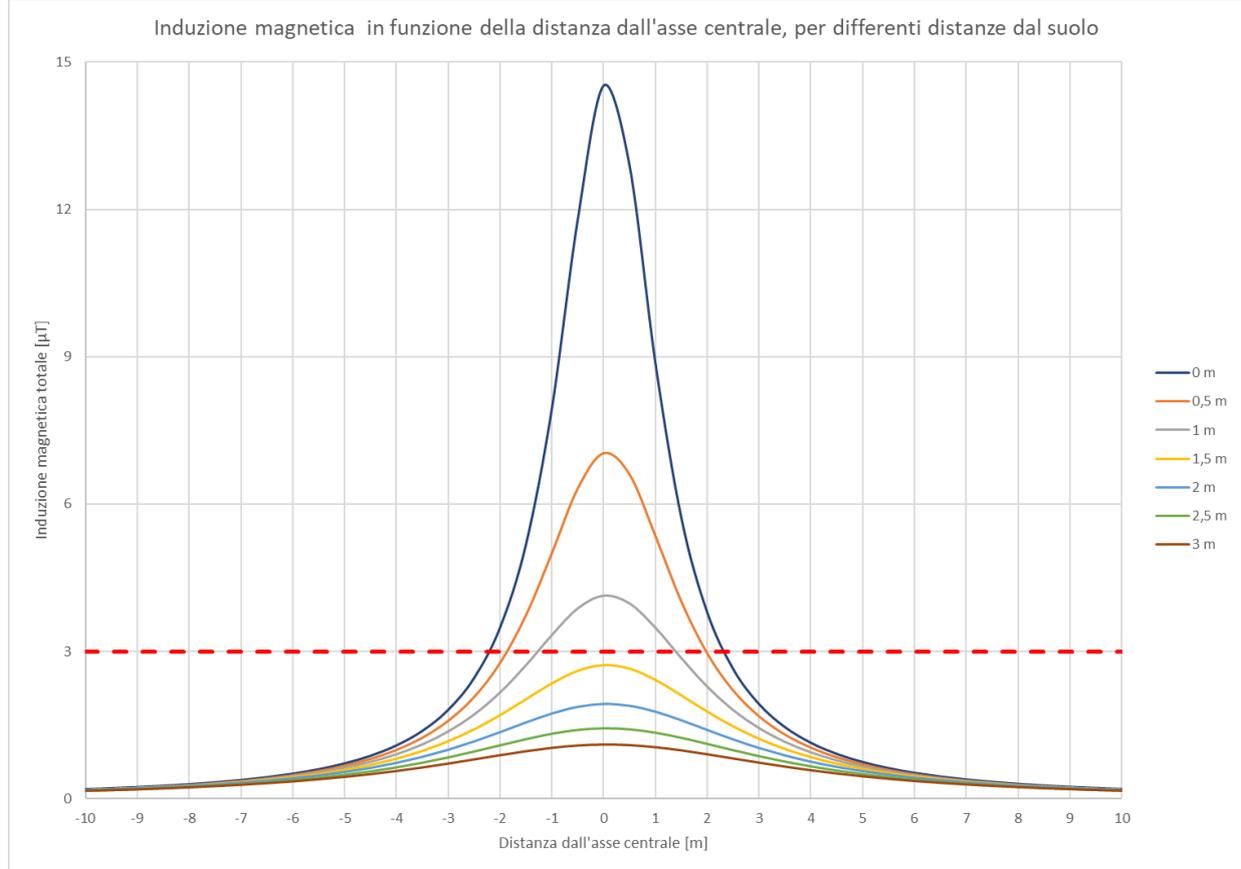


Figura 16 - Andamento dell'intensità del campo magnetico nel caso posa di quattro terne di cavi nello stesso scavo al variare della distanza dal livello del suolo e della distanza dal baricentro delle terne di cavi. In rosso l'obiettivo di qualità imposto dalla norma

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): 2,45 m;
- Distanza in verticale rispetto all'asse centrale baricentrico dei cavidotti con induzione magnetica superiore a 3 μT (terna 3 e 4): 2,75 m;
- Fascia di rispetto al di sopra del terreno: 1,40 m;

Distanza di Prima Approssimazione: 2,23 m, approssimata a 3 m.

5. Scavo con cinque terne di cavi, tipologia ARE4H5EE da 20,8/36 kV

Analogamente a quanto visto nel paragrafo precedente, viene condotto lo studio nel caso in cui all'interno dello stesso scavo siano presenti cinque 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 cinque 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 [μ T] è l'induzione magnetica in un generico punto di coordinate (x,y) rispetto al centro del sistema (baricentro delle cinque 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 cinque terne di cavi ARE4H5EE da 20,8/36 kV, di cui n.1 in formazione 3x1x120 mmq, n.3 in formazione 3x1x185 mmq e n.1 in formazione 3x1x630 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 (3x1x630 mmq, 3x1x185 mmq e 3x1x185 mmq) e ad una profondità maggiore quelle a sezione minore (3x1x185 mmq e 3x1x120 mmq), coerentemente con lo sviluppo del cavidotto di impianto e la disposizione delle singole linee.

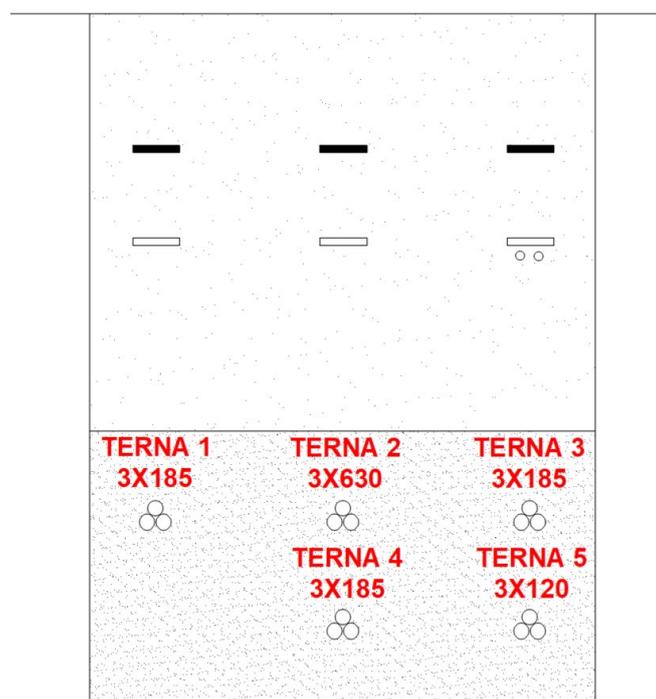


Figura 17 - Ipotesi di disposizione delle cinque terne nel caso peggiore con n.1 in formazione 3x1x120 mmq, n.3 in formazione 3x1x185 mmq e n.1 in formazione 3x1x630 mmq

Tabella 8 – Parametri geometrici e tecnici in ingresso considerati nella valutazione dei campi elettromagnetici generati da cinque terne di cavi posti nello stesso scavo.

Profondità di posa della terna 1, 2 e 3	1,05 m
Profondità di posa della terna 4 e 5	1,35 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
Distanza terna 4 dall'asse y	0 m
Distanza terna 5 dall'asse y	0,4 m
Sezione terna 1, 3 e 4	3x1x185 mm ²
Corrente cavi terna 1, 3 e 4	320 A
Sezione terna 2	3x1x630 mm ²
Corrente cavi terna 2	620 A
Sezione terna 5	3x1x120 mm ²
Corrente cavi terna 5	253 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 9 - Valori di intensità del campo magnetico nel caso posa di cinque 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 [μT]							
Distanza dall'asse centrale [m]	Distanza dal livello del suolo (m)						
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
-10	0,222	0,219	0,215	0,210	0,205	0,199	0,192
-9,5	0,245	0,242	0,237	0,231	0,224	0,217	0,209
-9	0,273	0,268	0,262	0,255	0,247	0,238	0,229
-8,5	0,305	0,300	0,292	0,284	0,274	0,263	0,251
-8	0,344	0,336	0,327	0,316	0,304	0,291	0,277
-7,5	0,390	0,381	0,369	0,355	0,340	0,323	0,306
-7	0,446	0,434	0,419	0,401	0,382	0,361	0,340
-6,5	0,515	0,499	0,479	0,456	0,431	0,405	0,378
-6	0,601	0,579	0,553	0,522	0,490	0,456	0,423
-5,5	0,710	0,680	0,644	0,603	0,560	0,516	0,474
-5	0,852	0,809	0,758	0,702	0,644	0,587	0,533
-4,5	1,039	0,977	0,903	0,824	0,746	0,671	0,601
-4	1,295	1,199	1,090	0,977	0,868	0,768	0,679
-3,5	1,654	1,501	1,333	1,168	1,016	0,882	0,765
-3	2,180	1,921	1,654	1,407	1,192	1,011	0,861
-2,5	2,982	2,516	2,076	1,701	1,396	1,154	0,963
-2	4,270	3,370	2,623	2,051	1,624	1,306	1,066
-1,5	6,422	4,575	3,299	2,442	1,860	1,454	1,163
-1	9,965	6,125	4,040	2,829	2,077	1,584	1,245
-0,5	14,627	7,671	4,672	3,129	2,236	1,675	1,301
0	17,319	8,414	4,949	3,253	2,300	1,711	1,323
0,5	15,077	7,821	4,734	3,159	2,252	1,685	1,307
1	10,491	6,339	4,139	2,879	2,106	1,601	1,256
1,5	6,818	4,775	3,405	2,502	1,896	1,476	1,178
2	4,531	3,529	2,719	2,110	1,661	1,330	1,082
2,5	3,152	2,633	2,154	1,753	1,431	1,178	0,980
3	2,293	2,006	1,716	1,451	1,224	1,034	0,878
3,5	1,732	1,564	1,382	1,205	1,044	0,902	0,781
4	1,350	1,246	1,128	1,007	0,892	0,787	0,693
4,5	1,080	1,012	0,933	0,849	0,766	0,687	0,614
5	0,882	0,836	0,782	0,722	0,661	0,601	0,545
5,5	0,733	0,702	0,663	0,619	0,574	0,528	0,484
6	0,619	0,596	0,568	0,536	0,501	0,466	0,432
6,5	0,529	0,513	0,491	0,467	0,441	0,413	0,386
7	0,458	0,445	0,429	0,410	0,390	0,368	0,346
7,5	0,399	0,390	0,378	0,363	0,347	0,330	0,312
8	0,352	0,344	0,335	0,323	0,310	0,296	0,282
8,5	0,312	0,306	0,298	0,289	0,279	0,268	0,256
9	0,278	0,274	0,268	0,260	0,252	0,243	0,233
9,5	0,250	0,246	0,241	0,235	0,229	0,221	0,213
10	0,226	0,223	0,219	0,214	0,208	0,202	0,195

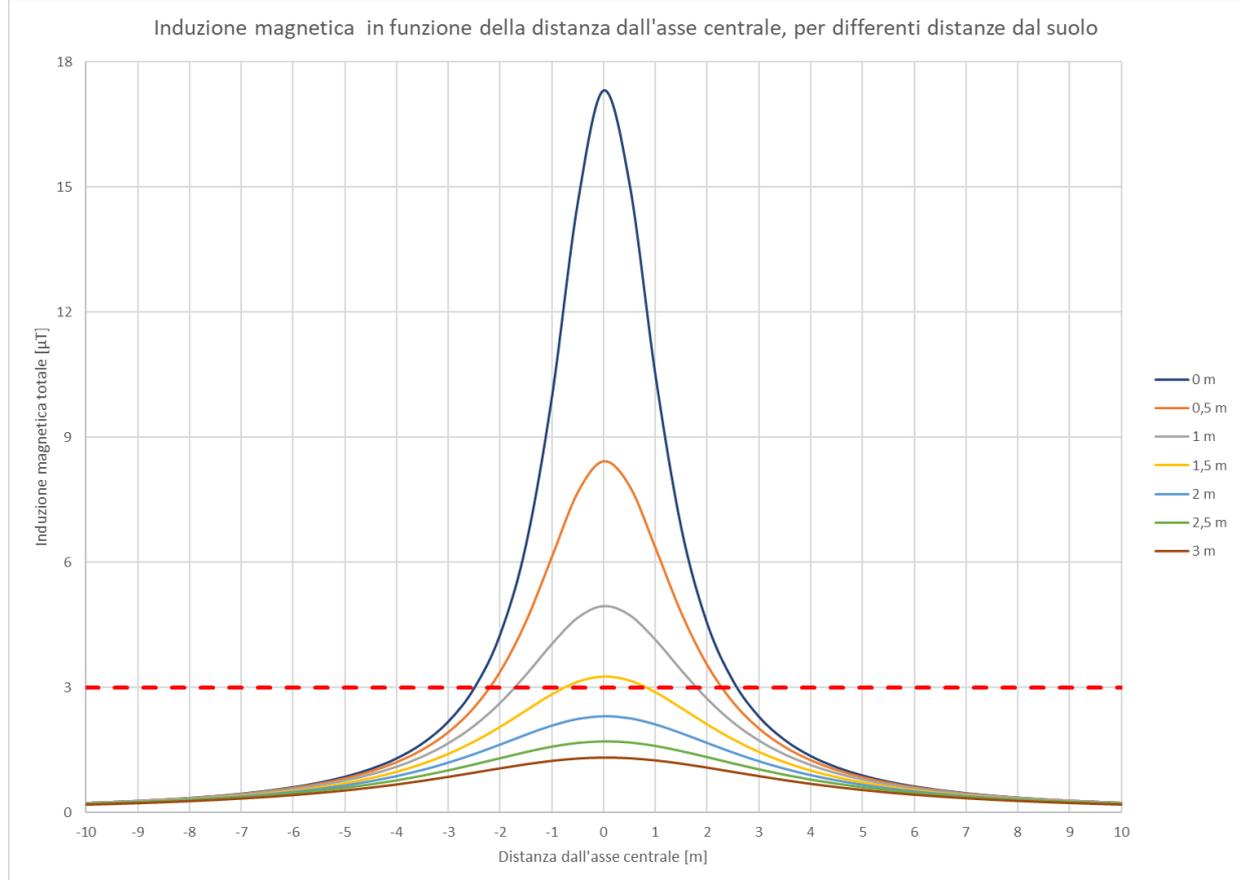


Figura 18 - Andamento dell'intensità del campo magnetico nel caso posa di cinque terne di cavi nello stesso scavo al variare della distanza dal livello del suolo e della distanza dal baricentro delle terne di cavi. In rosso l'obiettivo di qualità imposto dalla norma

Analizzando i risultati ottenuti si evidenzia:

- Distanza in verticale rispetto all'asse centrale baricentrico dei cavidotti con induzione magnetica superiore a 3 µT (terna 1, 2 e 3): 2,68 m;
- Distanza in verticale rispetto all'asse centrale baricentrico dei cavidotti con induzione magnetica superiore a 3 µT (terna 4 e 5): 2,98 m;
- Fascia di rispetto al di sopra del terreno: 1,63 m;

Distanza di Prima Approssimazione: 2,49 m, approssimata a 3 m.

6. Scavo con sei terne di cavi, tipologia ARE4H5EE da 20,8/36 kV

Analogamente a quanto visto nel paragrafo precedente, viene condotto lo studio nel caso in cui all'interno dello stesso scavo siano presenti sei 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 sei 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 [μ T] è l'induzione magnetica in un generico punto di coordinate (x,y) rispetto al centro del sistema (baricentro delle sei 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 cinque terne di cavi ARE4H5EE da 20,8/36 kV, di cui n.1 in formazione 3x1x120 mmq, n.4 in formazione 3x1x185 mmq e n.1 in formazione 3x1x630 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 (3x1x630 mmq, 3x1x185 mmq e 3x1x185 mmq) e ad una profondità maggiore quelle a sezione minore (3x1x185 mmq, 3x1x185 mmq e 3x1x120 mmq), coerentemente con lo sviluppo del cavidotto di impianto e la disposizione delle singole linee.

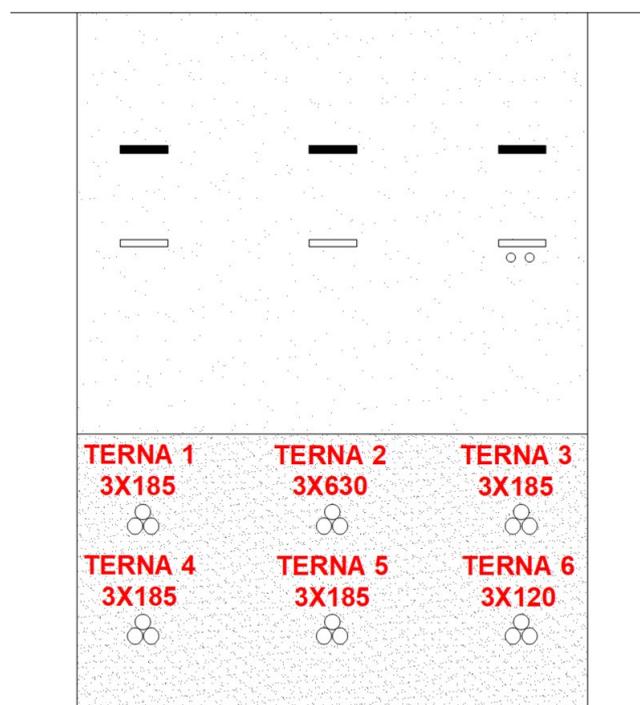


Figura 19 - Ipotesi di disposizione delle sei terne nel caso peggiore con n.1 in formazione 3x1x120 mmq, n.4 in formazione 3x1x185 mmq e n.1 in formazione 3x1x630 mmq

Tabella 10 – Parametri geometrici e tecnici in ingresso considerati nella valutazione dei campi elettromagnetici generati da sei terne di cavi posti nello stesso scavo.

Profondità di posa della terna 1, 2 e 3	1,05 m
Profondità di posa della terna 4, 5 e 6	1,35 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
Distanza terna 4 dall'asse y	-0,4 m
Distanza terna 5 dall'asse y	0 m
Distanza terna 6 dall'asse y	0,4 m
Sezione terna 1, 3, 4, 5	3x1x185 mm ²
Corrente cavi terna 1, 3, 4, 5	320 A
Sezione terna 2	3x1x630 mm ²
Corrente cavi terna 2	620 A
Sezione terna 6	3x1x120 mm ²
Corrente cavi terna 6	253 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 11 - Valori di intensità del campo magnetico nel caso posa di sei 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 [μT]							
Distanza dall'asse centrale [m]	Distanza dal livello del suolo (m)						
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
-10	0,260	0,256	0,252	0,246	0,239	0,232	0,224
-9,5	0,288	0,283	0,278	0,271	0,263	0,254	0,245
-9	0,320	0,315	0,308	0,299	0,289	0,279	0,268
-8,5	0,358	0,352	0,343	0,332	0,320	0,307	0,294
-8	0,404	0,395	0,384	0,371	0,356	0,340	0,324
-7,5	0,458	0,447	0,433	0,416	0,398	0,378	0,358
-7	0,525	0,510	0,492	0,471	0,447	0,422	0,397
-6,5	0,607	0,587	0,563	0,535	0,505	0,474	0,442
-6	0,709	0,683	0,650	0,613	0,574	0,534	0,494
-5,5	0,839	0,802	0,758	0,708	0,656	0,604	0,554
-5	1,008	0,955	0,893	0,824	0,755	0,687	0,623
-4,5	1,232	1,154	1,064	0,968	0,874	0,784	0,702
-4	1,538	1,419	1,284	1,147	1,017	0,897	0,791
-3,5	1,968	1,777	1,571	1,371	1,188	1,028	0,891
-3	2,598	2,273	1,946	1,648	1,391	1,177	1,001
-2,5	3,558	2,975	2,437	1,987	1,626	1,341	1,117
-2	5,089	3,971	3,068	2,387	1,884	1,512	1,233
-1,5	7,606	5,350	3,832	2,827	2,149	1,678	1,342
-1	11,610	7,075	4,650	3,252	2,387	1,821	1,431
-0,5	16,586	8,717	5,321	3,570	2,556	1,917	1,491
0	19,129	9,416	5,581	3,687	2,615	1,951	1,511
0,5	16,441	8,669	5,301	3,561	2,551	1,914	1,489
1	11,440	7,006	4,618	3,236	2,378	1,815	1,428
1,5	7,479	5,285	3,798	2,808	2,138	1,671	1,337
2	5,004	3,920	3,037	2,368	1,872	1,504	1,228
2,5	3,503	2,937	2,412	1,970	1,614	1,333	1,111
3	2,561	2,246	1,926	1,634	1,381	1,170	0,995
3,5	1,943	1,757	1,555	1,359	1,180	1,022	0,886
4	1,520	1,404	1,272	1,138	1,009	0,892	0,787
4,5	1,219	1,143	1,054	0,961	0,867	0,779	0,698
5	0,998	0,947	0,885	0,818	0,750	0,683	0,619
5,5	0,831	0,796	0,752	0,703	0,652	0,600	0,551
6	0,703	0,677	0,645	0,609	0,570	0,531	0,492
6,5	0,602	0,583	0,559	0,532	0,502	0,471	0,440
7	0,521	0,507	0,489	0,467	0,444	0,420	0,395
7,5	0,455	0,444	0,430	0,414	0,396	0,376	0,356
8	0,401	0,393	0,382	0,369	0,354	0,339	0,322
8,5	0,356	0,349	0,341	0,330	0,319	0,306	0,293
9	0,318	0,313	0,306	0,298	0,288	0,278	0,266
9,5	0,286	0,282	0,276	0,269	0,261	0,253	0,244
10	0,259	0,255	0,250	0,245	0,238	0,231	0,223

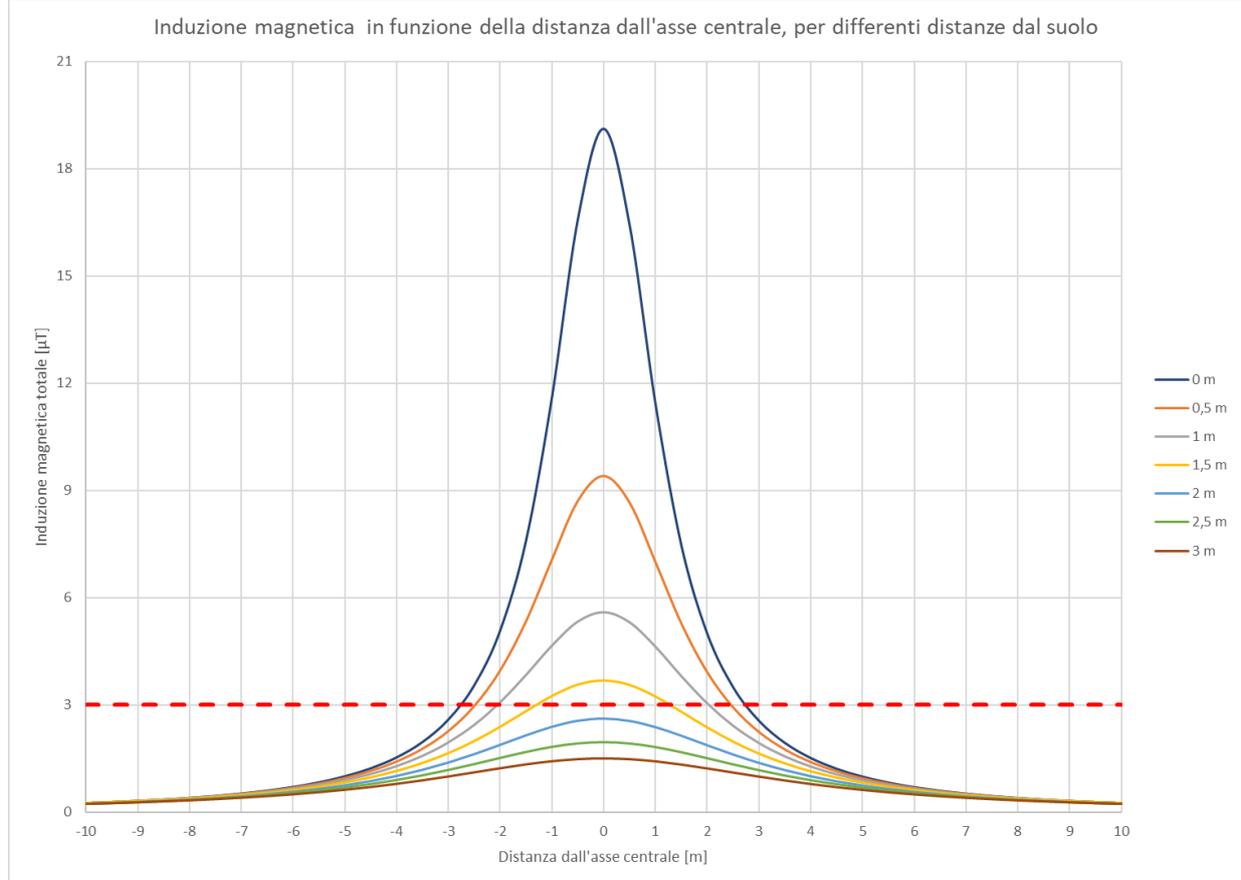


Figura 20 - Andamento dell'intensità del campo magnetico nel caso posa di sei terne di cavi nello stesso scavo al variare della distanza dal livello del suolo e della distanza dal baricentro delle terne di cavi. In rosso l'obiettivo di qualità imposto dalla norma

Analizzando i risultati ottenuti si evidenzia:

- Distanza in verticale rispetto all'asse centrale baricentrico dei cavidotti con induzione magnetica superiore a 3 μT (terna 1, 2 e 3): 2,87 m;
- Distanza in verticale rispetto all'asse centrale baricentrico dei cavidotti con induzione magnetica superiore a 3 μT (terna 4 e 5): 3,17 m;
- Fascia di rispetto al di sopra del terreno: 1,82 m;

Distanza di Prima Approssimazione: 2,79 m, approssimata a 3 m.

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) del cabinato stesso, 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 BT/36 kV. Per l'impianto in progetto è previsto l'impiego di transformation unit, all'interno delle quali saranno installati trasformatori con taglia pari a 1280 kVA, 1600 kVA, 1920 kVA, 2880 kVA e 3200 kVA.

A vantaggio di sicurezza l'analisi verrà condotta considerando un cabinato al cui interno è presente un trasformatore da 3200 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 3200 kVA un valore di I=2312 A e ipotizzando che i cavi sul lato BT del trasformatore stesso abbiano una formazione 3x(6x400) mm², con diametro esterno pari a circa 33,5 mm, si ottiene una DPA, arrotondata per eccesso all'intero superiore, pari a 4 m.

D'altra parte, nel caso in questione le cabine sono posizionate all'aperto e normalmente non sono permanentemente presidiate.

7.0 TUTELA DEI LAVORATORI ALL'ESPOSIZIONE AI CAMPI ELETTROMAGNETICI AI SENSI

Relativamente alla tutela della salute dei lavoratori derivante dall'esposizione ai campi elettromagnetici occorre fare riferimento al D.Lgs. n. 159 del 1° Agosto 2016 il quale apporta modifiche al già esistente D.Lgs. n. 81 del 9 Aprile 2008 in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. Si sottolinea che tale decreto fa riferimento esclusivamente agli effetti acuti associati all'esposizione ai CEM poiché attualmente non si dispone di prove scientifiche accertate dell'esistenza di un nesso causale fra l'esposizione ai CEM ed i possibili effetti a lungo termine, compresi i possibili effetti cancerogeni.

A tutte le categorie di lavoratori si applicano le disposizioni generali del Testo Unico, mentre i limiti di esposizione da adottare dipendono dalla tipologia di esposizione. La tipologia di esposizione è, determinata dalla specifica attività svolta dal lavoratore in relazione alla finalità del processo produttivo. Ne consegue che, in funzione dell'attività svolta, a uno stesso lavoratore potranno applicarsi i limiti di esposizione stabiliti dal Testo Unico oppure i limiti per la popolazione

In particolare, nel suddetto D.Lgs 159/2016 vengono indicati, nelle tabelle B1 e B2 riportate all'interno dell'Allegato XXXVI (Allegato 1), i valori di azione (VA) per esposizione rispettivamente ai campi elettrici e ai campi magnetici.

Intervallo di frequenza	VA (E) inferiori per l'intensità del campo elettrico [Vm ⁻¹] (valori RMS)	VA (E) superiori per l'intensità del campo elettrico [Vm ⁻¹] (valori RMS)
$1 \leq f < 25$ Hz	$2,0 \times 10^4$	$2,0 \times 10^4$
$25 \leq f < 50$ Hz	$5,0 \times 10^5 / f$	$2,0 \times 10^4$
$50 \text{ Hz} \leq f < 1,64$ kHz	$5,0 \times 10^5 / f$	$1,0 \times 10^6 / f$
$1,64 \leq f < 3$ kHz	$5,0 \times 10^5 / f$	$6,1 \times 10^2$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10$ MHz	$1,7 \times 10^2$	$6,1 \times 10^2$

Figura 21 - VA per i campi elettrici ambientali

Intervallo di frequenza	VA (B) inferiori per l'induzione magnetica [μT] (valori RMS)	VA (B) superiori per l'induzione magnetica [μT] (valori RMS)	VA (B) per l'induzione magnetica per esposizione localizzata degli arti [μT] (valori RMS)
$1 \leq f < 8$ Hz	$2,0 \times 10^5 / f^2$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$8 \leq f < 25$ Hz	$2,5 \times 10^4 / f$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$25 \leq f < 300$ Hz	$1,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3$ kHz	$3,0 \times 10^5 / f$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10$ MHz	$1,0 \times 10^2$	$1,0 \times 10^2$	$3,0 \times 10^2$

Figura 22 - VA per i campi magnetici ambientali

I valori di azione (VA), consentono una valutazione semplificata delle conformità ai pertinenti Valori Limite di Esposizione (VLE). In particolare, il rispetto dei VA garantisce il rispetto dei pertinenti VLE, mentre il superamento dei VA medesimi corrisponde all'obbligo di adottare le pertinenti misure di prevenzione e protezione di cui all'articolo 210, salvo che la valutazione effettuata in conformità dell'articolo 209, comma 1, dimostri che non sono superati i pertinenti VLE e che possono essere esclusi rischi per la sicurezza.

Le componenti dell'impianto sulle quali rivolgere l'attenzione al fine della valutazione dell'impatto elettromagnetico sulla salute dei lavoratori sono:

- Moduli Fotovoltaici;
- Inverter;

- Cavi BT;
- I cavidotti di impianto;
- I trasformatori BT/36 kV;

Sono state prese in considerazione solo le componenti che ricadono all'interno dell'area d'impianto.

Nel seguito si riportano le valutazioni condotte per ciascuno dei componenti sopra menzionati.

7.1 Moduli fotovoltaici

I moduli fotovoltaici lavorano in corrente e tensione continue e non in corrente alternata; per cui la generazione di campi variabili è limitata ai soli transitori di corrente (durante la ricerca del MPP da parte dell'inverter, e durante l'accensione o lo spegnimento) e sono comunque di brevissima durata.

In relazione all'esposizione dei lavoratori ai campi elettrici e magnetici statici, ai sensi della Norma CEI EN 50499 esse sono classificabili come sorgenti giustificabili, ovvero conformi a priori ai livelli di riferimento per l'esposizione della popolazione di cui alla Raccomandazione 1999/519/CE.

Luoghi e apparecchiature conformi a priori	
Tipo di apparecchiatura/luogo	Note
<p>Reti di alimentazione elettrica (50 Hz) nei luoghi di lavoro e circuiti di distribuzione e trasmissione dell'elettricità che attraversano o sorvolano il luogo di lavoro. Le esposizioni ai campi elettrici e magnetici vanno considerate separatamente.</p> <p>I seguenti elementi sono conformi per l'esposizione ai campi magnetici:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ tutte le installazioni elettriche con un valore nominale della corrente di fase non superiore a 100 A; ▪ tutti i circuiti singoli all'interno di un'installazione, con un valore nominale della corrente di fase non superiore a 100 A; ▪ tutti i circuiti i cui conduttori sono vicini e hanno una corrente netta non superiore a 100 A; ▪ sono compresi tutti i componenti delle reti che soddisfano i criteri precedenti (inclusi i cablaggi, le apparecchiature di manovra, i trasformatori, ecc.); ▪ tutti i conduttori aerei nudi. <p>I seguenti elementi sono conformi per l'esposizione ai campi elettrici:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ tutti i circuiti di cavi sotterranei o isolati, con qualsiasi tensione nominale ▪ tutti i circuiti aerei nudi con tensione nominale non superiore a 100 kV, o le linee aeree non superiori a 125 kV che sorvolano il luogo di lavoro, o di qualsiasi tensione se il luogo di lavoro è all'interno. 	<p>I criteri qui riportati per dimostrare la conformità ai limiti di esposizione nel luogo di lavoro sono basati sulla dimostrazione che le esposizioni sono inferiori ai limiti minimi della Raccomandazione CE (1999) sulle esposizioni EMF per la popolazione. Tali criteri sono sufficienti a dimostrare la conformità per la maggior parte dei luoghi di lavoro.</p> <p>I criteri di valutazione basati direttamente sui limiti di esposizione della Direttiva CE per il luogo di lavoro, sono indicati nell'Allegato F (vedi capitolo 14) della norma EN 50499. Essi utilizzano 500 A al posto di 100 A, 200 kV invece di 100 kV e 250 kV invece di 125 kV. Le liste di controllo indicate nell'allegato F della norma (vedi capitolo 14) possono quindi essere utilizzate per dimostrare la conformità ai campi magnetici ed elettrici in qualsiasi luogo di lavoro.</p>

Figura 23 - Estratto Elenco delle sorgenti giustificabili -Tabella 1 della Norma CEI EN 50499

Inoltre, si ricorda come nella certificazione dei moduli fotovoltaici alla norma CEI 82-8 (IEC 61215) non sono comunque menzionate prove di compatibilità elettromagnetica, poiché irrilevanti.

7.2 Inverter

Gli inverter sono apparecchiature che al loro interno utilizzano un trasformatore ad alta frequenza per ridurre le perdite di conversione. Essi, pertanto, sono costituiti per loro natura da componenti elettronici operanti ad alte frequenze. D'altro canto, il legislatore ha previsto che tali macchine, prima di essere immesse sul mercato, possiedano le necessarie certificazioni a garantirne sia l'immunità dai disturbi elettromagnetici esterni, sia le ridotte emissioni per minimizzarne l'interferenza elettromagnetica con altre apparecchiature elettroniche posizionate nelle vicinanze con la rete elettrica stessa (via cavo).

7.3 Cavi BT

I cavi elettrici di bassa tensione sono attraversati da corrente continua o alternata a seconda se si prenda in considerazione rispettivamente il tratto che collega il pannello fotovoltaico all'inverter o l'inverter alla propria Trasformation Unit.

I cavi elettrici di bassa tensione in corrente continua generano durante l'esercizio campi elettrici e campi magnetici statici. In relazione all'esposizione ai campi elettrici statici, sono classificabili, ai sensi della Norma CEI EN 50499 Tabella 1, come sorgenti giustificabili.

Per quanto riguarda l'esposizione ai campi magnetici statici, considerando che i cavi saranno attraversati da una corrente inferiore a 100 A, sono anch'essi classificabili come sorgenti giustificabili, ai sensi della Norma CEI EN 50499 Tabella 1, come sorgenti giustificabili.

Relativamente ai cavi BT in corrente alternata, invece, secondo quanto previsto dal Decreto 29 maggio 2008 (§3.2), la tutela in merito alle fasce di rispetto di cui all'art.6 del DPCM 8 luglio 2003 non si applica ad esse, in quanto tali fasce di rispetto hanno un'ampiezza ridotta. Alla luce di ciò l'obiettivo di qualità di 3 μ T viene raggiunto già a brevissime distanze; pertanto, il campo magnetico risulta certamente inferiore ai VA previsti dal D.Lgs. n. 159/2016. Per quanto concerne i campi elettrici, essendo tali cavi interrati, risultano schermati nei riguardi del campo elettrico, che quindi risulta pressoché nullo.

7.4 Cavidotti 36 kV

Per il cavidotto di impianto occorre tenere in considerazione le diverse modalità di posa dei cavi, che per il progetto in esame saranno le seguenti:

- Scavo con una sola terna di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV;
- Scavo con due terne di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV;
- Scavo con tre terne di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV;
- Scavo con quattro terne di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV;
- Scavo con cinque terne di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV;
- Scavo con sei terne di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV.

In relazione all'esposizione dei lavoratori ai campi elettrici, ai sensi della Norma CEI EN 50499 la linea è classificabile come sorgenti giustificabili, ovvero conforme a priori ai livelli di riferimento per l'esposizione della popolazione di cui alla Raccomandazione 1999/519/CE, in quanto costituita da cavi interrati e avente una frequenza di 50 Hz.

Si riporta l'analisi per quanto concerne il campo magnetico, per il quale i VA proposti dal D.Lgs 159/2016

sono riportati nella seguente tabella:

Intervallo di frequenza	VA (B) inferiori per l'induzione magnetica [μ T] (valori RMS)	VA (B) superiori per l'induzione magnetica [μ T] (valori RMS)	VA (B) per l'induzione magnetica per esposizione localizzata degli arti [μ T] (valori RMS)
$1 \leq f < 8$ Hz	$2,0 \times 10^5 / f^2$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$8 \leq f < 25$ Hz	$2,5 \times 10^4 / f$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$25 \leq f < 300$ Hz	$1,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3$ kHz	$3,0 \times 10^5 / f$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10$ MHz	$1,0 \times 10^2$	$1,0 \times 10^2$	$3,0 \times 10^2$

Figura 24 - VA per I campi magnetici ambientali a frequenze comprese tra 1 Hz e 10 MHz (D.Lgs, 159/2016)

Nota la frequenza di esercizio dell'impianto, pari a 50 Hz, si ottiene:

$$VA_{\text{inf}} = 1,0 \times 10^3 = 1.000 [\mu\text{T}] ;$$

$$VA_{\text{sup}} = 3,0 \times 10^5 / 50 = 6.000 [\mu\text{T}] ;$$

$$VA = 9,0 \times 10^5 / 50 = 18.000 [\mu\text{T}] \text{ (per esposizione localizzata degli arti)}$$

Si riporta nel seguito, il risultato del calcolo dell'induzione magnetica utilizzando la stessa formula usata in precedenza

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

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.

Considerando il caso più gravoso previsto per il progetto in esame, ovvero la posa di sei terne di cavi ARE4H5EE 20,8/36 kV, di cui n.1 in formazione 3x1x120 mmq, n.4 in formazione 3x1x185 mmq e n.1 in formazione 3x1x630 mmq.

Profondità di posa della terna 1, 2 e 3	1,05 m
Profondità di posa della terna 4, 5 e 6	1,35 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
Distanza terna 4 dall'asse y	-0,4 m
Distanza terna 5 dall'asse y	0 m
Distanza terna 6 dall'asse y	0,4 m
Sezione terna 1, 3, 4, 5	3x1x185 mm ²
Corrente cavi terna 1, 3, 4, 5	320 A
Sezione terna 2	3x1x630 mm ²
Corrente cavi terna 2	620 A

Sezione terna 6	3x1x120 mm ²
Corrente cavi terna 6	253 A

I risultati proposti sono sintetizzati nella seguente tabella:

D[m]	B[μ T]
0,5	16,44
1	11,44
1,5	7,47
2	5,00
2,5	3,50
3	2,56
3,5	1,94
4	1,52

Figura 25: Induzione magnetica a diverse distanze dall'cavidotto MT di collegamento

Dalla figura sopra si può notare come si ottenga un **valore di B pari a circa 2,56 μ T già a distanza di 3 m**, il quale risulta notevolmente inferiore ai limiti previsti dal D.Lgs 159/2016.

7.5 Transformation Unit

In relazione all'esposizione dei lavoratori al campo elettrico generato dalle apparecchiature installate all'interno delle cabine di conversione e trasformazione dell'energia elettrica prodotta, vanno applicati i Valori Limite di Esposizione VLE relativi agli effetti sensoriali per il campo elettrico interno a frequenze comprese tra 1 Hz e 400 Hz e i Valori di Azione VA per i campi elettrici ambientali a frequenze comprese tra 1 Hz e 10 MHz.

Tuttavia, poiché tutti i componenti dell'impianto presentano al loro interno schermature o parti metalliche collegate all'impianto di terra locale, i campi elettrici risultanti all'interno dei locali menzionati risultano trascurabili. tutte gli schermi e le masse metalliche saranno collegati a terra, imponendo il potenziale di terra, consentendo di schermare completamente i campi elettrici. Nel caso in cui gli effetti mitigatori delle schermature non dovessero risultare idonee, verranno adottate idonee misure di protezione e prevenzione.

Per quanto concerne, invece, i campi magnetici, di seguito vengono riportati la tabella con i valori di azione (VA) proposti dal D.Lgs 159/2016 ed i risultati ottenuti:

Intervallo di frequenza	VA (B) inferiori per l'induzione magnetica [μT] (valori RMS)	VA (B) superiori per l'induzione magnetica [μT] (valori RMS)	VA (B) per l'induzione magnetica per esposizione localizzata degli arti [μT] (valori RMS)
$1 \leq f < 8 \text{ Hz}$	$2,0 \times 10^5 / f^2$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$8 \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2,5 \times 10^4 / f$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$25 \leq f < 300 \text{ Hz}$	$1,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$3,0 \times 10^5 / f$	$3,0 \times 10^5 / f$	$9,0 \times 10^5 / f$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$1,0 \times 10^2$	$1,0 \times 10^2$	$3,0 \times 10^2$

Figura 26: VA per i campi magnetici ambientali a frequenze comprese tra 1 Hz e 10 MHz (D.Lgs, 159/2016)

Nota la frequenza di esercizio dell'impianto, pari a 50 Hz, si ottiene:

$$VA_{\text{inf}} = 1,0 \times 10^3 = 1.000 [\mu\text{T}];$$

$$VA_{\text{sup}} = 3,0 \times 10^5 / 50 = 6.000 [\mu\text{T}];$$

$$VA = 9,0 \times 10^5 / 50 = 18.000 [\mu\text{T}] \text{ (per esposizione localizzata degli arti)}$$

Considerando che la principale fonte di emissione del campo magnetico è il trasformatore, è stato calcolato il valore di induzione magnetica generata ricorrendo alla formula di Siemens di seguito riportata:

$$B = 0,72 v_{cc} \% \frac{\sqrt{S_n}}{d^{2,8}}$$

Dove:

- v_{cc} è la tensione di cortocircuito in valore percentuale del trasformatore;
- S_n è la potenza apparente nominale del trasformatore in kVA;
- d è la distanza dal trasformatore espressa in m.

Considerando il caso peggiore in termini di campo magnetico, rappresentato dal trasformatore da 3200 kVA, avente una $v_{cc}\%$ pari al 6%, a distanza di 1 m dal centro si ottiene un **valore di B pari a circa 244 μT** , il quale risulta notevolmente inferiore ai limiti previsti dal D.Lgs 159/2016. Tale risultato può essere esteso

anche al caso degli altri trasformatori.

In ogni caso, i lavoratori esposti al CEM per motivi di carattere professionale, in relazione allo svolgimento di specifiche attività lavorative, verranno sottoposti a sorveglianza sanitaria e riceveranno una formazione ed addestramento in relazione al rischio specifico.

8.0 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. È stata inoltre effettuata un'analisi volta a valutare eventuali elementi di rischio in termini di esposizione dei lavoratori ai sensi del D.lgs. 159/16.

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:

- Scavo con una sola terna di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV: è necessaria l'apposizione di una DPA di 2 m;
- Scavo con due terne di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV: è necessaria l'apposizione di una DPA di 2 m;
- Scavo con tre terne di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV: è necessaria l'apposizione di una DPA di 2 m;
- Scavo con quattro terne di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV: è necessaria l'apposizione di una DPA di 3 m;
- Scavo con cinque terne di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV: è necessaria l'apposizione di una DPA di 3 m;
- Scavo con sei terne di cavi del tipo ARE4H5EE da 20,8/36 kV: è necessaria l'apposizione di una DPA di 3 m;
- Transformation unit da 3200 kVA: è necessaria l'apposizione di una DPA di 4 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 fotovoltaico in oggetto, escludendo quindi eventuali altre linee aeree o interrate esterne allo stesso. Inoltre, le opere dell'impianto verranno posizionate all'interno di un perimetro recintato e dunque con accesso al pubblico limitato. Considerato ciò, è possibile affermare che le opere suddette, grazie anche alle soluzioni costruttive e di localizzazione adottate, 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.

Sulla base dell'analisi effettuata è possibile affermare che le sorgenti di emissione di campi elettromagnetici individuabili nell'ambito del progetto in esame non costituiscono un elemento di rischio in termini di esposizione dei lavoratori ai sensi del D.lgs. 159/16, in quanto, per ognuna di esse, i valori di campo magnetico risultano inferiori al Valore di Azione (VA) indicato nel medesimo decreto. Risultati analoghi si ottengono anche per il campo elettrico che risulta trascurabile grazie alla presenza di apposite schermature all'interno dei componenti. Si fa inoltre presente che, in fase di costruzione dell'impianto le linee saranno fuori tensione, pertanto i lavoratori non saranno esposti a nessun campo elettromagnetico; nelle fasi di collaudo e manutenzione ordinaria e/o straordinaria, invece, come precedentemente descritto, per tutte le

componenti dell'impianto vengono rispettati i valori di azione (e pertanto i valori limite di esposizione) indicati nel D.lgs. 159/2016. In definitiva, è pertanto possibile affermare che per il progetto in analisi, non sussistono criticità derivanti dall'esposizione dei lavoratori ai campi elettromagnetici, secondo quanto riportato nel D.lgs. 159/16.

Il Progettista
Ing. Luca Spaccino