



REGIONE  
PUGLIA



PROVINCIA  
LECCE



COMUNE NARDO'

OGGETTO:

Progetto di un impianto agrivoltaico denominato "CSPV LEVERANO", di potenza pari a 19.578 MWp e delle relative opere di connessione alla RTN, da realizzarsi nel comune di Nardò (LE)

ELABORATO:

## RELAZIONE CAVIDOTTO APPARECCHIATURE ELETTRICHE E DI IMPATTO ELETTROMAGNETICO



PROPONENTE:



ABEI ENERGY GREEN ITALY VI S.R.L.  
VIA VINCENZO BELLINI, 22  
00198- ROMA (RM)  
P.IVA 16335531006

PROGETTAZIONE:

Ing. Carmen Martone  
Iscr. n. 1872  
Ordine Ingegneri Potenza  
C.F. MRTCMN73D56H703E



Geol. Raffaele Nardone  
Iscr. n. 243  
Ordine Geologi Basilicata  
C.F. NRDRFL71H04A509H

EGM PROJECT S.R.L.  
VIA VERRASTRO 15/A  
85100- POTENZA (PZ)  
P.IVA 02094310766  
REA PZ-206983

Livello prog.	Cat. opera	N° . prog.elaborato	Tipo elaborato	N° foglio	Tot. fogli	Nome file	Scala
PD	I.IF	A.08	R				
REV.	DATA	DESCRIZIONE			ESEGUITO	VERIFICATO	APPROVATO
00	DICEMBRE 2022	Emissione				Geol. Raffaele Nardone EGM Project	Ing. Carmen Martone EGM Project

# Sommario

<b>Premessa</b>	<b>1</b>
<b>1 Normativa tecnica di riferimento</b>	<b>2</b>
<b>2 Descrizione generale del progetto</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Opere civili ed industriali da realizzare all'interno del campo fotovoltaico</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Reti elettriche ed informatiche interne (Cavidotti interrati)</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Dimensionamento cavi</b>	<b>10</b>
2.3.1 Cavi AT	10
2.3.2 Cavi BT	12
<b>3 Valutazione dei campi elettrici e campi magnetici a bassa frequenza (ELF)</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Definizioni e unità di misura</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Valori di induzione magnetica generati da un filo isolato</b>	<b>16</b>
<b>3.3 Valori limite</b>	<b>17</b>
<b>3.4 Differenza tra campi magnetici indotti da linee elettriche aeree e da cavidotti interrati</b>	<b>18</b>
<b>4 Fasce di rispetto</b>	<b>20</b>
<b>4.1 Cavidotti interrati AT</b>	<b>20</b>
<b>4.2 LINEE ELETTRICHE INTERRATE IN AT</b>	<b>20</b>
4.2.1 Calcolo e verifica dei campi ELF emessi dalla linea interrata	21
4.2.2 Condizioni di carico ed ipotesi di calcolo	23
<b>4.3 Cabine di trasformazione interne al campo fotovoltaico e cabine di smistamento</b>	<b>24</b>
4.3.1 Possibili interventi di riduzione del campo elettromagnetico	25
4.3.2 Distanza di prima approssimazione per cabine di trasformazione con installato un solo trasformatore	25
4.3.3 Distanza di prima approssimazione per quadri elettrici	26

## Premessa

---

La presente relazione accompagna il progetto definitivo di realizzazione di un impianto agrofotovoltaico di produzione di energia da fonte fotovoltaica con potenza nominale di 19,58 MWp sito nel comune di Leverano.

Secondo quanto previsto dal preventivo di connessione rilasciato da Terna lo schema di allacciamento alla RTN prevede che l'impianto venga collegato "in antenna a 36 kV su una nuova Stazione Elettrica (SE) di Trasformazione della RTN da inserire in entra-esce sulla linea RTN a 380 kV "Erchie 380 – Galatina 380".

La presente relazione ha lo scopo di descrivere le emissioni di campi magnetici, elettrici ed elettromagnetici generati durante l'esercizio del campo fotovoltaico, dai collegamenti in AT, dalle cabine di trasformazione e dai quadri.

Il campo fotovoltaico sarà esercito in alta tensione in corrente alternata alla tensione di 36 kV.

# 1 Normativa tecnica di riferimento

---

Il presente progetto è coerente con le seguenti disposizioni normative:

Legge n. 186 del 01.03.68 - Costruzione e realizzazione di materiali e impianti a regola d'arte;

- D.M. 37/08 - Norme per la sicurezza degli impianti;
- D.lgs. 81/08 – Testo Unico sulla salute e Sicurezza sul Lavoro;
- D.lgs. 106/09 – Disposizioni integrative e correttive del decreto legislativo 9 aprile 2008 n° 81, in materia della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro;
- CEI 0-2 - Guida per la definizione della documentazione di progetto degli impianti elettrici;
- CEI 0-16 - Regola tecnica di riferimento per la connessione di utenti attivi e passivi alle reti AT ed MT delle imprese distributrici di energia elettrica;
- CEI 11-1 - Impianti elettrici con tensione superiore a 1000 V in corrente alternata;
- CEI 11-20 - Impianti di produzione di energia elettrica e gruppi di continuità collegati a reti di I e II categoria;
- CEI 11-35 - Guida per l'esecuzione di cabine elettriche MT/BT del cliente/utente finale;
- CEI 11-37 - Guida per l'esecuzione degli impianti di terra nei sistemi utilizzatori di energia alimentati a tensione maggiore di 1 kV;
- CEI 17-13 - Apparecchiature assiemate di protezione e manovra per bassa tensione (Quadri BT);
- CEI 17-63 - Sottostazioni prefabbricate ad alta tensione/bassa tensione;
- CEI 64-8 - Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e 1500 V in corrente continua;
- CEI 81-10/1 (EN 62305-1) - "Protezione contro i fulmini. Parte 1: Principi Generali";
- CEI 81-10/2 (EN 62305-2) - "Protezione contro i fulmini. Parte 2: Valutazione del rischio";
- CEI 81-10/3 (EN 62305-3) - "Protezione contro i fulmini. Parte 3: Danno materiale alle strutture e pericolo per le persone";
- CEI 81-10/4 (EN 62305-4) - "Protezione contro i fulmini. Parte 4: Impianti elettrici ed elettronici nelle strutture";
- CEI 81-3 - "Valori medi del numero dei fulmini a terra per anno e per chilometro quadrato dei Comuni d'Italia, in ordine alfabetico";
- CEI 20 - Guida per l'uso di cavi in bassa tensione;
- CEI UNEL 35024/1 - Cavi elettrici isolati con materiale elastomerico o termoplastico per tensioni nominali non superiori a 1000 V in corrente alternata e 1500 V in corrente continua - Portate di corrente in regime permanente per posa in aria;
- CEI UNEL 35027 - Cavi di energia per tensione nominale U superiore ad 1 kV con isolante di carta impregnata o elastomerico o termoplastico - Portate di corrente in regime permanente - Generalità per la posa in aria ed interrata;
- D.M. 10/09/2010 - Linee guida per l'autorizzazione degli impianti da fonti rinnovabili;
- REGIO DECRETO LEGISLATIVO 30 Dicembre 1923, n. 326 - Riordinamento e riforma della legislazione in materia di boschi e di terreni montani;
- D.lgs. 22 gennaio 2004, n. 42 - Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n.137;
- D.M. 04/07/2019 - Incentivazione dell'energia elettrica prodotta dagli impianti eolici on shore, solari fotovoltaici, idroelettrici e a gas residuati dei processi di depurazione;
- D.lgs. n.42/04 - Piano Paesaggistico Regionale;
- Legge Regionale 11 settembre 2017, n.21;
- Legge Regionale 22 novembre 2018, n.38.

Relativamente al presente elaborato, in particolare, si è tenuto altresì conto delle seguenti ulteriori disposizioni normative:

- D.M. del 29 maggio 2008 - Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti;
- d.p.c.m. del 8 luglio 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";
- Legge n.36 del 22 febbraio 2001;
- Decreto Interministeriale del 21 marzo 1988 n.449;
- CEI ENV 50166-1 1997-06 - Esposizione umana ai campi elettromagnetici Bassa frequenza (0-10 kHz);
- CEI 11-60 2000-07 - Portata al limite termico delle linee elettriche aeree esterne con tensione maggiore di 100 kV;
- CEI 211-6 2001-01 - Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz-10 kHz con riferimento all'esposizione umana;
- CEI 106-11 2006-02 - Guida per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti secondo le disposizioni del dpcm 8 luglio 2003. Parte 1 Linee elettriche aeree o in cavo;
- CEI 211-4 2008-09 - Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee e da stazioni elettriche.

Per quanto riguarda la definizione delle grandezze elettromagnetiche di interesse si fa riferimento alla norma CEI 211-6 (2001-01), prima edizione, "*Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 kHz - 10 KHz, con riferimento all'esposizione umana*".

In merito, invece, alle definizioni di esposizione, limite di esposizione, valore di attenzione, obiettivo di qualità, elettrodotto, valgono le definizioni contenute all'art. 3 della legge 22 febbraio 2001, n. 36, "*Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici*":

- *esposizione*: è la condizione di una persona soggetta a campi elettrici, magnetici, elettromagnetici, o a correnti di contatto, di origine artificiale;
- *limite di esposizione*: è il valore di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, considerato come valore di immissione, definito ai fini della tutela della salute da effetti acuti, che non deve essere superato in alcuna condizione di esposizione della popolazione e dei lavoratori per le finalità di cui all'articolo 1, comma 1, lettera a);
- *valore di attenzione*: è il valore di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, considerato come valore di immissione, che non deve essere, superato negli ambienti abitativi, scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze prolungate per le finalità di cui all'articolo 1, comma 1, lettere b) e c). Esso costituisce misura di cautela ai fini della protezione da possibili effetti a lungo termine e deve essere raggiunto nei tempi e nei modi previsti dalla legge;
- *obiettivi di qualità*: 1) i criteri localizzativi, gli standard urbanistici, le prescrizioni e le incentivazioni per l'utilizzo delle migliori tecnologie disponibili, indicati dalle leggi regionali secondo le competenze definite dall'articolo 8; 2) i valori di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, definiti dallo Stato secondo le previsioni di cui all'articolo 4, comma 1, lettera a), ai fini della progressiva mitigazione dell'esposizione ai campi medesimi;
- *elettrodotto*: è l'insieme delle linee elettriche, delle sottostazioni e delle cabine di trasformazione;
- *esposizione dei lavoratori e delle lavoratrici*: è ogni tipo di esposizione dei lavoratori e delle lavoratrici che, per la loro specifica attività lavorativa, sono esposti a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici;

- *esposizione della popolazione*: è ogni tipo di esposizione ai campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici. ad eccezione dell'esposizione di cui alla lettera f) e di quella intenzionale per scopi diagnostici o terapeutici.

## 2 Descrizione generale del progetto

---

Il progetto prevede la realizzazione di un impianto per la produzione di energia elettrica mediante tecnologia fotovoltaica, tramite l'installazione a terra di pannelli fotovoltaici montati su idonee strutture metalliche di supporto posizionate in direzione EST – OVEST e con inclinazione verso sud di 20°.

I pannelli, che trasformano l'irraggiamento solare in corrente elettrica continua, saranno collegati in serie formando una "stringa" che, a sua volta, sarà collegata in parallelo con le altre in apposite cassette di stringa (combiner box). Dai quadri di parallelo l'energia prodotta dai pannelli verrà trasferita mediante conduttori elettrici interrati alle cabine di campo in cui sono installati gli inverter centralizzati che la trasformano in corrente alternata. Le cabine di campo ospitano anche il trasformatore e fungono anche da "cabine di trasformazione" incrementando il voltaggio fino alla tensione (AT) 36kV. A valle dell'ultima cabina di campo, l'energia verrà trasferita mediante un unico cavidotto esterno alla futura stazione Stazione Elettrica di Trasformazione (SE) della Rete di Trasmissione Nazionale (RTN) tramite il punto di connessione posto nel territorio comunale di Leverano.

L'impianto è caratterizzato da una **potenza di picco installata in corrente continua di 19,58MW** ed è suddiviso in 2 "sottocampi", collegati a 2 cabine di campo di conversione e trasformazione.

### 2.1 Opere civili ed industriali da realizzare all'interno del campo fotovoltaico

---

Le opere dell'intero ciclo elettrico riguardano:

- Collegamenti elettrici in C.C. tra le singole stringhe ai quadri di stringa e da questi agli inverter centralizzati da 4700 kVA e uscita in corrente alternata a 690V.
- Collegamento degli inverter di ciascun sottocampo al trasformatore BT/AT con doppio secondario e primario a 36kV;
- Collegamento in entra-esce con cavidotti AT delle cabine di trasformazione e cavidotto di collegamento dell'impianto alla cabina di consegna in prossimità della RTN;

### 2.2 Reti elettriche ed informatiche interne (Cavidotti interrati)

---

All'interno del campo fotovoltaico in primis vi sarà una distribuzione BT per il collegamento dei quadri di stringa (combiner box) con le power station di conversione e trasformazione mediante linee interrate esercite a tensioni in DC, non superiori a 1500 V.

In ogni cabina (cabina di campo) di trasformazione del sottocampo fotovoltaico, arriverà e partirà un cavo opportunamente dimensionato che, attraverso un pozzetto di ispezione e manovra, costituirà la rete principale in AT interna al campo fotovoltaico.

Il circuito di uscita dal campo 1 verrà collegato in entra esce all'unità di trasformazione del campo 2 fino al quadro generale d'impianto in AT da cui avrà origine il circuito di uscita.

In totale si avranno i seguenti circuiti:

**Tabella 1: circuiti AT impianto FV**

Circuito		Potenza P	Tensione Vn
		MW	KV
Campo 1	1.1	3,75	36
	1.2	3,75	36
Collegamento 1-2		7,50	36
Campo 2	2.1	3,75	36
	2.2	3,75	36
Connessione RTN		15	36

La rete di distribuzione in Media Tensione interna al campo sarà realizzata con linea principale utilizzando cavi tripolari con anima in rame tipo RG7H1R –26/45 kV IEC (IEC 60502) con sezione variabile in funzione della potenza trasportata. Si riporta in di seguito la scheda tecnica del cavo.



**RG7H1R da 1,8/3kV a 26/45 kV**  
(UNIPOLARI)

UNIPOLARI MEDIA TENSIONE  
MEDIOM VOLTAGE

Model Product: 701-705-710-713-716-724-730 - 20160412

**Norme di riferimento** **Standards**

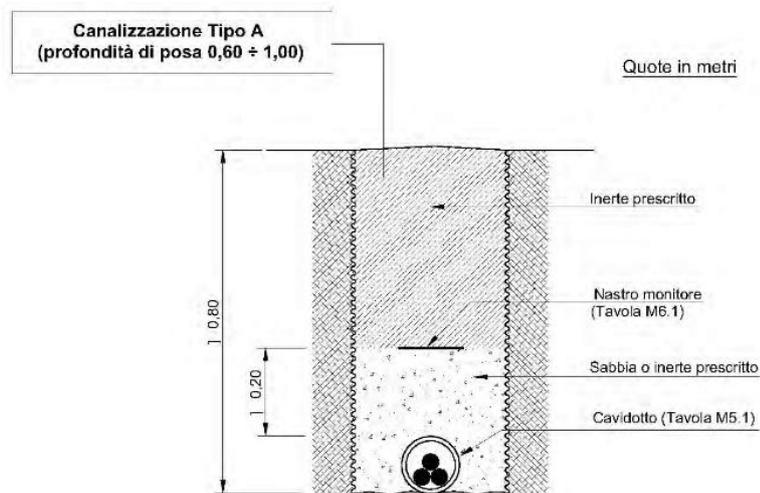
CEI 20-13, IEC 60502 CEI 20-16 CEI EN 60332-1-2 (IEC 60840 per 26/45 kV)



Conduttore rigido di rame rosso ricotto. Classe 2.	Rigid class 2 red copper conductor.
Semiconduttore interno elastomerico estruso	Inner semi-conducting layer
Isolamento in HEPR di qualità G7	HEPR Insulation in G7 quality
Semiconduttore esterno elastomerico estruso pelabile a freddo per il grado 1,8/3kV solo su richiesta	Outer semi-conducting layer special high module hepr for 1.8 / 3 kV only on request
Schermo costituito a fili di rame rosso	Red copper wire shield.
Guaina PVC qualità RZ/ST2	PVC sheath in RZ/ST2 quality

<i>Tensione nominale U0</i>	da 1,8kV a 26kV	<i>Nominal voltage U0</i>
<i>Tensione nominale U</i>	da 3kV a 45kV	<i>Nominal voltage U</i>
<i>Temperatura massima di esercizio</i>	+90°C	<i>Maximun operating temperature</i>
<i>Temperatura massima di corto circuito</i>	+250°C	<i>Maximun short circuit temperature</i>
<i>Temperatura minima di esercizio (senza shock meccanico)</i>	-15°C	<i>Min. operating temperature (without mechanical shocks)</i>
<i>Temperatura minima di installazione e maneggio</i>	0°C	<i>Minimum installation and use temperature</i>

I cavi saranno posati ad una profondità minima di 1,50 m e circondati da uno strato di sabbia vagliata e protetti da tegoli vi sarà un nastro segnalatore ad un'altezza variabile tra 30/40 cm. I cavidotti seguiranno preferenzialmente percorsi interrati lungo la viabilità esistente. Si riporta la sezione di posa tipo conforme alla norma CEI 11-17 :



**Figura 1: sezione di posa (cavidotto interno)**

Nel medesimo scavo sarà posto eventualmente il cavidotto della rete telefonica per la trasmissione dei segnali tra le singole cabine ed il centro di elaborazione e controllo dati, le caratteristiche costruttive saranno simili a quelle dei cavidotti per i cavi AT ad eccezione della profondità che sarà contenuta entro i 60 cm ed il tipo di cavo utilizzato dovrà essere idoneo alla trasmissione dei segnali telefonici.

La sezione tipo di posa dei cavi sarà composta da una base di sabbia in cui verrà annegato il cavo di terra in Cu di almeno 200 mm<sup>2</sup>, i cavi di potenza, il cavo di segnale in fibra ottica posto in tubo PVC corrugato, uno strato di calcestruzzo dello spessore di 10 cm (per gli attraversamenti stradali), un nastro segnalatore e un ultimo strato, a ricoprire lo scavo, di rilevato compattato.

Gli scavi saranno ripristinati con riempimento di terreno granulare per un'altezza di 40 cm dal piano di campagna e successivamente chiuso con terreno vegetale (sarà ripristinato lo stato dei luoghi).

Saranno infine posizionati pozzetti prefabbricati di ispezione in CLS, per la manutenzione della rete elettrica, distanziati tra loro di circa 100 m, in cui collocare le giunzioni dei cavi e i picchetti di terra.

Il percorso del collegamento dell'impianto fotovoltaico alla SE RTN è stato scelto tenendo conto di molteplici fattori, quali:

- contenere per quanto possibile i tracciati dei cavidotti sia per occupare la minor porzione possibile di territorio, sia per non superare certi limiti di convenienza tecnico-economica;
- evitare per quanto possibile di interessare case sparse ed isolate, rispettando le distanze prescritte dalla normativa vigente;
- Evitare interferenze con zone di pregio naturalistico, paesaggistico e archeologico;
- transitare su aree di minor pregio interessando aree prevalentemente agricole e sfruttando la viabilità esistente per quanto possibile.

L'isolamento sarà garantito mediante guaina termo-restringente.

Il cavo a fibre ottiche per il monitoraggio ed il telecontrollo delle turbine sarà di tipo monomodale e verrà alloggiato all'interno di un tubo corrugato in PVC o in un monotubo in PEAD posto nello stesso scavo del cavo di potenza.

I cavi verranno posati ad una profondità di circa 150 cm, con una placca di protezione in PVC (nei casi in cui non è presente il tubo corrugato) ed un nastro segnalatore.

I cavi verranno posati in una trincea scavata a sezione obbligata che avrà una larghezza variabile compresa tra 50 cm ed 1m(cfr. sezioni tipo cavidotto). La sezione di posa dei cavi sarà variabile a seconda della loro ubicazione in sede stradale o in terreno (cfr. sezioni tipo cavidotto).

Come accennato, nella stessa trincea verranno posati i cavi di energia, la fibra ottica necessaria per la comunicazione.

La posa dei cavi si articolerà nelle seguenti attività:

- scavo a sezione obbligata della larghezza e della profondità precedentemente menzionate;
- posa del cavo di potenza e del dispersore di terra;
- eventuale rinterro parziale con strato di sabbia vagliata;
- posa del tubo contenente il cavo in fibre ottiche;
- posa dei tegoli protettivi;
- rinterro parziale con terreno di scavo;
- posa nastro monitore;
- rinterro complessivo con ripristino della superficie originaria;
- apposizione di paletti di segnalazione presenza cavo.

L'asse del cavo posato nella trincea si scosterà dall'asse della stessa solo di qualche centimetro a destra ed a sinistra, al fine di evitare dannose sollecitazioni dovute all'assestamento del terreno. Durante le operazioni di posa, gli sforzi di tiro applicati ai conduttori non dovranno superare i 60 N/mm<sup>2</sup> rispetto alla sezione totale. Il raggio di curvatura dei cavi durante le operazioni di installazione non dovrà essere inferiore a 3 m.

Lo schermo metallico dei singoli spezzoni di cavo verrà messo a terra da entrambe le estremità della linea.

In corrispondenza dell'estremità di cavo connesso alla cabina di raccolta, onde evitare il trasferimento di tensioni di contatto pericolose a causa di un guasto sull'alta tensione, la messa a terra dello schermo avverrà solo all'estremità connessa alla stazione di utenza.

La realizzazione delle giunzioni verrà effettuata secondo le seguenti indicazioni:

- prima di tagliare i cavi controllare l'integrità della confezione e l'eventuale presenza di umidità;
- non interrompere mai il montaggio del giunto o del terminale;
- utilizzare esclusivamente materiali contenuti nella confezione.

Ad operazione conclusa saranno applicate delle targhe identificatrici su ciascun giunto in modo da poter individuare l'esecutore, la data e le modalità d'esecuzione.

Su ciascun tronco fra l'ultima turbina e la cabina di raccolta verranno collocati dei giunti di isolamento tra gli schermi dei due diversi impianti di terra (dispersore di terra della stazione elettrica e dispersore di terra dell'impianto eolico). Essi garantiranno la tenuta alla tensione che si può stabilire tra i due schermi dei cavi a 36kV.

Le terminazioni dei cavi in fibra ottica dovranno essere effettuate nella seguente modalità:

- posa del cavo, da terra al relativo cassetto ottico, previa eliminazione della parte eccedente, con fissaggio del cavo o a parete o ad elementi verticali con apposite fascette, ogni 0.50 m circa;
- sbucciatura progressiva del cavo;
- fornitura ed applicazione, su ciascuna fibra ottica, di connettore;
- esecuzione della "lappatura" finale del terminale;
- fissaggio di ciascuna fibra ottica.

Le figure seguenti riportano alcune sezioni tipo del cavidotto:

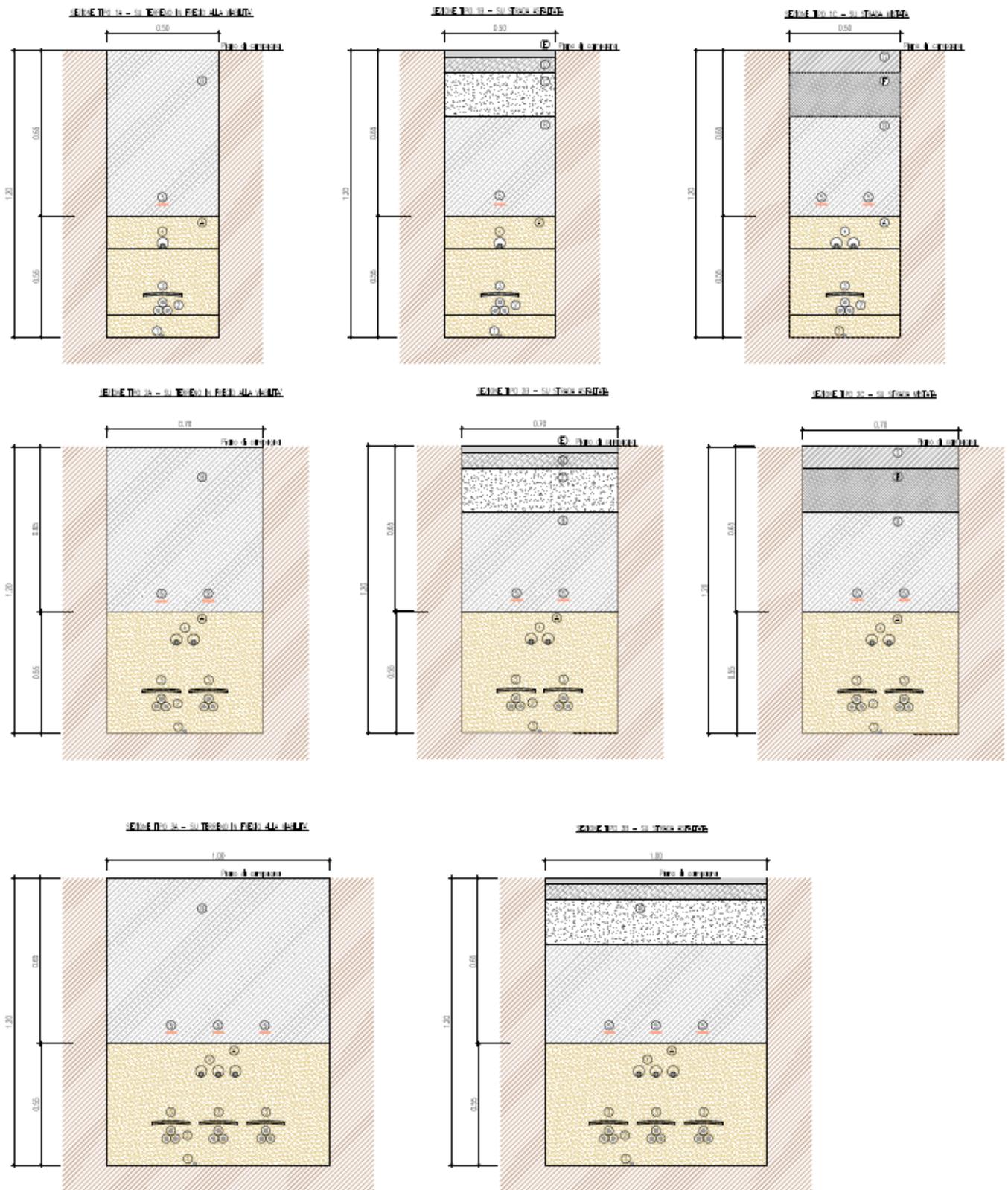


Figura 2: sezioni tipo cavidotti

LEGENDA		
(A) Sabbia $\varnothing$ 0-3 mm	(1) Cavo di terra	(G) Stabilizzato $\varnothing$ 0-25 mm
(B) Rinterro con terreno proveniente dagli scavi	(2) Cavi MT	
(C) Conglomerato bituminoso - Strato di base	(3) Tegolino di protezione	
(D) Conglomerato bituminoso - Strato di collegamento (Bynder)	(4) Fibra ottica in tubazione $\varnothing$ 50	
(E) Strato di usura	(5) Nastro monitore	
(F) Pietrisco $\varnothing$ 70-120 mm	(6) Cavidotto in PEAD SN 8 $\varnothing$ 150	

**Figura 3: legenda sezioni cavidotto**

## 2.3 Dimensionamento cavi

### 2.3.1 Cavi AT

La rete elettrica a 36kV sarà realizzata con posa completamente interrata assicurando il massimo dell'affidabilità e della economia di esercizio.

Per il collegamento delle power station dei campi fotovoltaici si prevede la realizzazione di linee a 36kV a mezzo di collegamenti del tipo "entra-esce".

La rete a 36 kV, di lunghezza totale pari a circa 2,3 km, sarà realizzata per mezzo di cavi del tipo RG7H1R 26/45 kV o equivalenti con conduttore in rame.

L'isolamento sarà garantito mediante guaina termo-restringente.

I cavi verranno posati ad una profondità minima di circa 120 cm, con una placca di protezione in PVC (nei casi in cui non è presente il tubo corrugato) ed un nastro segnalatore.

I cavi verranno posati in una trincea scavata a sezione obbligata che avrà una larghezza di 50 cm. La sezione di posa dei cavi sarà variabile a seconda della loro ubicazione in sede stradale o in terreno (cfr. sezioni tipo cavidotto).

I cavi AT a 36kV sono stati dimensionati in modo tale da soddisfare la relazioni:

$$I_b \leq I_z$$

$$\Delta V\% \leq 4\%$$

dove:

- $I_b$  è la corrente di impiego del cavo;
- $I_z$  è la portata del cavo, calcolata tenendo conto del tipo di cavo e delle condizioni di posa;
- $\Delta V\%$  è la massima caduta di tensione calcolata a partire dalla cabina di consegna fino all'aerogeneratore più lontano (massima caduta di tensione su ogni sottocampo).

I cavi per l'impianto di alta tensione a 36 kV saranno del tipo RG7H1R 26/45 kV o similari, con conduttore rigido di rame rosso ricotto Classe 2 di tipo unipolare e/o unipolare avvolto ad elica, semiconduttore interno elastomerico estruso, isolamento in HEPR di qualità G7, guaina in PVC qualità RZ/ST2, direttamente interrati o infilati in corrugato.

La portata  $I_z$  di un cavo con una determinata sezione e isolante è notevolmente influenzata dalle condizioni di installazione. Nella posa interrata la portata può variare in funzione della profondità di posa, della resistività e della temperatura del terreno. Aumentando la profondità di posa, con temperatura del terreno invariata, la portata di un cavo si riduce.

La portata dipende però anche dalla resistività e dalla temperatura del terreno che aumentano verso la superficie, soprattutto nei periodi estivi, vanificando in tal modo i benefici che si possono ottenere a profondità di posa minori.

La portata di un cavo interrato diminuisce anche in caso di promiscuità con altre condutture elettriche e l'influenza termica tra i cavi aumenta sensibilmente se sono posati in terra piuttosto che in aria.

La portata di corrente in regime permanente  $I_z$  per il cavo utilizzato è stata ricavata, a partire dalla corrente  $I_0$  (capacità del cavo), tenendo conto di opportuni coefficienti di correzione relativi a condizioni di posa diverse da quelle di riferimento, mediante la seguente formula:

$$I_z = I_0 \times k$$

Dove:

$I_0$  = portata per posa interrata per cavi di tipo RG7H1R 26/45 kV con resistività terreno 1,5 K m/W;

$k$  = prodotto di opportuni coefficienti di correzione, ovvero:

$K_{tt}$  = fattore di correzione per posa interrata e temperature diverse da 20 °C;

$K_d$  = fattore di correzione per spaziatura tra cavi tripolari pari a 250 mm;

$K_p$  = fattore di correzione per profondità di posa diversi da 0.8 m (cavi direttamente interrati);

$K_r$  = fattore di correzione per valori di resistività termica diversa da 1,5 Km/W.

Tanto più elevata è la resistività termica del terreno tanto maggiore diventa la difficoltà del cavo a smaltire il calore attraverso gli strati del terreno. La resistività termica varia a seconda del tipo di terreno e del suo grado di umidità.

Si riportano di seguito le tabelle riepilogative dei principali cavi AT previsti in progetto:

**Tabella 2 – CAVI AT**

CIRCUITO			CAVI AT	
			Campo 1 - 2	Esterno
			RAME RG7H1R 26/45 Kv	RAME RG7H1R 26/45 Kv
Tensione trasporto	Vn	KV	36	36
	Cosfi		0,9	0,9
	Sinfi	sì	0,4	0,4
Potenza nominale	Pn	MW	7,50	15,00

Corrente di impiego	$I_b$	A	<b>133,65</b>	<b>267,29</b>
sezione cavo	S	mm <sup>2</sup>	<b>120</b>	<b>240</b>
Lunghezza linea	L	m	<b>150</b>	<b>2 300</b>
Resistenza della linea	$R_L$	$\Omega / \text{km}$	0,153	0,075
Reattanza della linea	$X_L$	$\Omega / \text{km}$	0,120	0,100
Caduta di tensione	$\Delta V$	V	6,6	118,7
	$\Delta V$	%	<b>0,02%</b>	<b>0,33%</b>
PORTATA			<b>VERIFICATO</b>	<b>VERIFICATO</b>
<b>Materiale isolamento</b>			PVC	PVC
<b>Portata nominale</b>	$I_0$	A	<b>355</b>	<b>510</b>
<b>Temperatura terreno</b>	T	°C	<b>25</b>	<b>25</b>
<b>terne</b>		nr	<b>2</b>	<b>1</b>
<b>distanza</b>		m	<b>0,25</b>	<b>0,25</b>
<b>Profondità di posa</b>		m	<b>1,0</b>	<b>1,2</b>
<b>Resistività termica</b>		K*m/W	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>
<b>Fattori di correzione</b>				
<b>K1</b>	ktt		0,95	0,95
<b>K2</b>	kd		0,92	1,00
<b>K3</b>	kp		0,97	0,95
<b>K4</b>	kr		1	1
<b>Portata cavo</b>	$I_z$	A	<b>235</b>	<b>359</b>

### 2.3.2 Cavi BT

I cavi BT saranno del tipo TECSUN (PV) PV1-F 0,6/1 kV AC (1,5 kV DC), con conduttore in rame stagnato flessibile secondo IEC 60228 classe 5, isolante HEPR reticolato 120 °C (mescola tipo EI6/EI8) e guaina in gomma EVA reticolata 120 °C (mescola tipo EM4/EM8).

I cavi BT in corrente continua a 1500V sono stati dimensionati in modo tale da soddisfare la relazioni:

$$I_b \leq I_z$$

$$\Delta V\% \leq 4\%$$

dove:

- $I_b$  è la corrente di impiego del cavo;
- $I_z$  è la portata del cavo, calcolata tenendo conto del tipo di cavo e delle condizioni di posa;
- $\Delta V\%$  è la massima caduta di tensione calcolata a partire dalla cabina di consegna fino all'aerogeneratore più lontano (massima caduta di tensione su ogni sottocampo).

Per il calcolo della portata ci si riferisce alla tabella CEI UNEL 35026 fasc. 5777 "Cavi elettrici isolati con materiale elastomerico o termoplastico per tensioni nominali di 1.000 V in corrente alternata e 1.500 V in corrente continua. Portate di corrente in regime permanente per posa interrata". Dalla norma viene fornita la formula per il calcolo della portata effettiva  $I_z$  che può essere ricavata, a partire dalla corrente  $I_0$ , tenendo conto di opportuni coefficienti di correzione relativi a condizioni di posa diverse da quelle di riferimento.

$$I_z = I_0 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4$$

Dove:

$I_0$  =portata per posa interrata per cavi di tipo con resistività terreno 1K m/W;

$K_1$  =fattore di correzione per temperature diverse da 20 °C;

$K_2$  = fattore di correzione per gruppi di più circuiti affiancati sullo stesso piano;

$K_3$  =fattore di correzione per profondità di posa;

$K_4$  =fattore di correzione per terreni con resistività termica diversa da 1Km/W.

Tabella 3 – CAVI BT

VERIFICA CAVI BT - CORRENTE CONTINUA						
CIRCUITO			Linea BT	Linea BT	Linea BT	Linea BT
			Inverter 1	Inverter 2	Inverter 3	Inverter 4
			ALLUMINIO	ALLUMINIO	ALLUMINIO	ALLUMINIO
TIPO CAVO			TECSUN PV1-F 0,6/1 Kv AC (1,5kv DC)			
Tipo corrente			DC	DC	DC	DC
Tensione trasporto	Vn	V	1500	1500	1500	1500
Stringhe		n	16	16	16	16
Potenza stringa		kW	19,50	19,50	19,50	19,50
Potenza nominale C-box	Pn	kW	312,0	312,0	312,0	312,0
<b>Corrente di impiego</b>	<b><math>I_b</math></b>	<b>A</b>	<b>208,00</b>	<b>208,00</b>	<b>208,00</b>	<b>208,00</b>
sezione cavo	S	mm <sup>2</sup>	185	185	185	185
Lunghezza linea	L	m	500	500	500	500
Resistenza della linea	R <sub>L</sub>	Ω / km	0,108	0,108	0,108	0,108
Caduta di tensione	ΔV	V	1,21	1,21	1,21	1,21
	ΔV	%	0,08%	0,08%	0,08%	0,08%
<b>Portata</b>						
<b>Materiale isolamento</b>			EPR	EPR	EPR	EPR
<b>Portata nominale</b>			<b>360</b>	<b>360</b>	<b>360</b>	<b>360</b>
<b>Temperatura terreno</b>			<b>40</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>40</b>
<b>Cavi</b>			<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>6</b>

distanza		m	0,25	0,25	0,25	0,25
Profondità di posa		m	0,8	0,8	0,8	0,8
Resistività termica		K*m/W	1,2	1,2	1,2	1,2
K1			0,85	0,85	0,85	0,85
K2			0,80	0,80	0,80	0,80
K3			1,02	1,02	1,02	1,02
K4			0,93	0,93	0,93	0,93
I <sub>z</sub>		A	232	232	232	232
VERIFICA			VERIFICATO	VERIFICATO	VERIFICATO	VERIFICATO

Tutti i cavi BT ausiliari esterni ai quadri sono cavi del tipo FG16(O)R16 conformi alla normativa CPR, adatti per l'alimentazione di energia nell'industria, nei cantieri, nell'edilizia residenziale, per posa fissa all'interno e all'esterno, anche in ambienti bagnati, per posa interrata diretta e indiretta.

Le caratteristiche principali dei cavi FG16R16 e FG16OR16 sono:

- Non propagazione della fiamma;
- Non propagazione dell'incendio;
- *Bassissima emissione fumi, gas tossici e corrosivi.*
- *Buona resistenza agli oli ed ai grassi industriali;*
- *Buon comportamento alle basse temperature.*
- **Conduttore:** Rame rosso, formazione flessibile, classe 5.
- **Isolamento:** Gomma, qualità **G16**.
- **Cordatura:** I conduttori isolati sono cordati insieme.
- **Riempitivo:** Termoplastico, penetrante tra le anime (*solo nei cavi multipolari*).
- **Guaina esterna:** PVC, qualità **R16**.
- **Colore:** Grigio
- **Tensione nominale U<sub>0</sub>/U:** 600/1.000 V c.a. - 1.500 V c.c.
- **Tensione Massima Um:** 1.200 V c.a. 1.800 V c.c.
- **Massima Temperatura di esercizio:** 90°C
- **Temperatura minima di esercizio:** -15°C (*in assenza di sollecitazioni meccaniche*)
- **Temperatura massima di corto circuito:** 250°C
- **Temperatura minima di posa:** 0°C

I cavi BT interni ai quadri ausiliari e ai quadri di controllo saranno cavi unipolari flessibili, per energia e cablaggio, isolati in polivinilcloruro (PVC) del tipo N07V-K 450/750 V.

## 3 Valutazione dei campi elettrici e campi magnetici a bassa frequenza (ELF)

---

Per quanto riguarda il campo elettromagnetico generato dalle singole apparecchiature installate nelle cabine, non esistendo un modello matematico che permetta il calcolo preventivo, si sottolinea che tutte le apparecchiature installate rispetteranno i requisiti di legge e tutte le normative tecniche riguardo la compatibilità e le emissioni elettromagnetiche.

In materia di inquinamento elettromagnetico, una delle problematiche più studiate è certamente quella concernente l'esposizione ai campi elettrici e magnetici dispersi nell'ambiente dalle linee di trasporto e di distribuzione dell'energia elettrica, la cui frequenza (50 Hz in Europa) rientra nella cosiddetta banda ELF (30 – 300Hz). 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.

In generale gli elettrodotti generano sia un **campo elettrico** che un **campo magnetico**.

Il campo elettrico è legato in maniera direttamente proporzionale alla tensione della sorgente; esso si attenua, allontanandosi da un elettrodotto, in maniera inversamente proporzionale alla distanza dai conduttori.

Poiché i valori delle tensioni di linea variano poco con le correnti che le attraversano, l'intensità del campo elettrico può considerarsi, in prima approssimazione, costante.

La presenza di alberi, oggetti conduttori o edifici in prossimità delle linee riduce l'intensità del campo elettrico e, in particolare all'interno degli edifici si possono misurare intensità di campo fino a 10 (anche 100) volte inferiori a quelle rilevabili all'esterno.

L'intensità del campo magnetico generato in corrispondenza di un elettrodotto dipende invece dall'intensità della corrente circolante nel conduttore; tale flusso risulta estremamente variabile sia nell'arco di una giornata sia in base alla stagione. Non c'è alcun effetto schermante nei confronti dei campi magnetici da parte di edifici, alberi o altri oggetti vicini alla linea, quindi, all'interno di eventuali edifici circostanti si può misurare un campo magnetico di intensità comparabile a quello riscontrabile all'esterno.

È noto che sia il campo elettrico che il campo magnetico decadono all'aumentare della distanza dalla linea elettrica, ma mentre il campo elettrico è facilmente schermabile da oggetti quali legno, metallo, ma anche alberi ed edifici, il campo magnetico non è schermabile dalla maggior parte dei materiali di uso comune. L'analisi del campo elettromagnetico generato dai conduttori e la valutazione relativa ai vari componenti dell'impianto fa riferimento ai limiti previsti dall'applicazione del D.M. 20 Maggio 2008 con riferimento al D.P.C.M. del 8 Luglio 2003.

L'analisi dell'impatto elettromagnetico effettuata nel seguito analizza sia le scelte effettuate sia individua lungo il tracciato dei conduttori, in prossimità delle cabine di trasformazione e dei quadri elettrici, le fasce di rispetto (DPA) coerentemente a quanto richiesto dalla norma.

### 3.1 Definizioni e unità di misura

---

Quando si parla di campi elettromagnetici a bassa frequenza ci si riferisce a quei campi compresi nell'intervallo 0 Hz e 3 kHz. In questo studio ci riferiamo ai campi a frequenza industriale generati dall'utilizzo dell'energia elettrica alla frequenza di 50 Hz: la frequenza della rete elettrica.

Tabella 4: intervalli di frequenza

SORGENTI	INTERVALLI DI FREQUENZA
Elettrodotti, stazioni di trasformazione e tutte le apparecchiature funzionanti a frequenza industriale	0Hz – 10 kHz
Forni ad induzione	10 kHz – 30 kHz
Riscaldatori ad induzione, schermi video e trasmettitori in AM	30 kHz – 300 kHz
Riscaldatori a radiofrequenza	3 MHz – 30 MHz
Trasmettitori in FM e Televisione	30 MHz – 300 MHz
Radiomobile, telefoni cellulari, forni a microonde	300 MHz – 3 GHz
Ponti radio	3 GHz – 30 GHz
Radar	30 GHz – 300 GHz

Sorgenti di campi ELF sono le linee elettriche per il trasporto e la distribuzione dell'energia elettrica e gli impianti per la trasformazione di tale energia nonché tutte quelle applicazioni alimentate a corrente elettrica di uso medico, industriale, civile e domestico (elettrodomestici).

Come detto sopra un cavidotto genera, con andamento radiale rispetto ai cavi, un campo elettromagnetico dovuto al passaggio della corrente.

### 3.2 Valori di induzione magnetica generati da un filo isolato

Il campo elettrico (E) dipende principalmente dalla tensione a cui funziona la sorgente. La sua intensità viene espressa in Volt per metro (V/m).

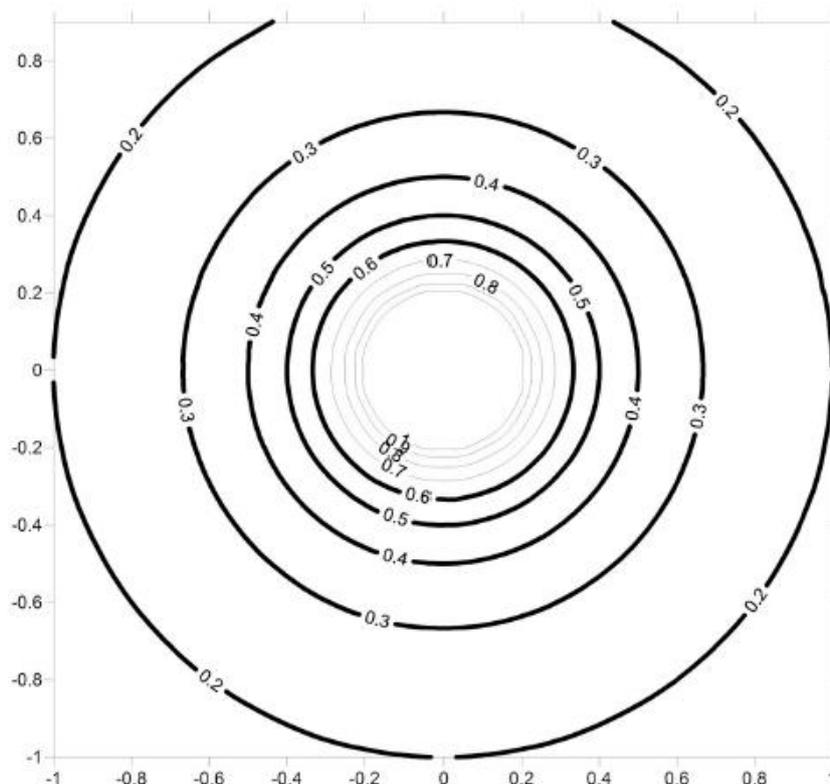


Figura 4: Valori di induzione magnetica generati da un filo isolato

Il campo d'induzione magnetica (B) dipende principalmente dalla corrente che attraversa il cavidotto. La sua intensità si misura in tesla (T) e nei suoi sottomultipli il millitesla (mT) un millesimo di tesla, il microtesla ( $\mu$ T) un milionesimo di tesla.

Inoltre si definiscono:

- **esposizione**, la condizione di una persona soggetta a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici di origine artificiale;

- **limite di esposizione**, il valore di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, considerato come valore definito ai fini della tutela della salute da effetti acuti;
- **valore di attenzione**, valore di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, che non deve essere superato negli ambienti abitativi, scolastici, e nei luoghi adibiti a permanenze prolungate;
- **obiettivi di qualità**, valori di campo elettrico, magnetico ed elettromagnetico, definito ai fini della progressiva minimizzazione dell'esposizione ai campi medesimi.

### 3.3 Valori limite

---

Il citato D.P.C.M. 8 luglio 2003 fissa i limiti di esposizione e i valori di attenzione, per la protezione della popolazione dall'esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) connessi al funzionamento ed all'esercizio degli elettrodotti, in particolare:

- **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.

Lo stesso DPCM, all'art 6, fissa i parametri per la determinazione delle fasce di rispetto degli elettrodotti, per le quali si dovrà fare riferimento all'obiettivo di qualità (**B = 3  $\mu$ T**) di cui all'art. 4 sopra richiamato ed alla portata della corrente in servizio normale. L'allegato al Decreto 29.05.2008 definisce quale fascia di rispetto lo spazio circostante l'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. Ai fini del calcolo della fascia di rispetto si omettono verifiche del campo elettrico, in quanto nella pratica questo determinerebbe una fascia (basata sul limite di esposizione, nonché valore di attenzione pari a 5 kV/m) che risulta sempre inferiore a quella fornita dal calcolo dell'induzione magnetica. **Pertanto, nei successivi paragrafi sono state calcolate le fasce di rispetto dagli elettrodotti del progetto in esame, facendo riferimento al limite di qualità di 3  $\mu$ T.**

Alla frequenza di 50 Hz il campo elettrico (misurato in V/m) e quello magnetico (misurato in T) possono essere considerati disaccoppiati, e analizzati, dal punto di vista fisico-matematico, separatamente.

Per sua natura il corpo umano (costante dielettrica molto diversa da quella dell'aria) possiede capacità schermanti nei confronti del campo elettrico. Il campo elettrico quindi ha, per i valori di campo generato da qualsiasi installazione elettrica convenzionale, effetti del tutto trascurabili (solo in prossimità di linee AT a 400 kV, tensione non raggiunta in Italia in nessuna linea di trasmissione AT, si raggiungono valori di 4 kV/m prossimi al limite di legge per zone frequentate, valore che si abbatte esponenzialmente

all'aumentare della distanza dal conduttore. Il campo elettrico risulta proporzionale alla tensione del circuito considerato.

Viceversa, il corpo umano presenta una permeabilità magnetica sostanzialmente simile a quella dell'aria, per cui non presenta grandi capacità schermanti contro il campo magnetico, il quale lo attraversa completamente rendendo i suoi effetti più pericolosi di quelli del campo elettrico. Il campo magnetico è proporzionale al valore di corrente che circola nei conduttori elettrici ed i valori di corrente che si possono avere nelle ordinarie installazioni elettriche possono generare campi magnetici che possono superare i valori imposti dalle norme.

La normativa attualmente in vigore disciplina in modo differente i valori ammissibili di campo elettromagnetico, distinguendo i "campi elettromagnetici quasi statici" ed i "campi elettromagnetici a radio frequenza".

Nel caso dei campi quasi statici, ha senso ragionare separatamente sui fenomeni elettrici e magnetici e ha quindi anche senso imporre separatamente dei limiti normativi alle intensità del campo elettrico e dell'induzione magnetica. Il modello quasi statico è applicato al caso della distribuzione di energia, in relazione alla frequenza di distribuzione dell'energia in rete che è pari a 50Hz. In generale gli elettrodotti dedicati alla trasmissione e distribuzione di energia elettrica sono percorsi da correnti elettriche di intensità diversa, ma tutte alla frequenza di 50 Hz, e quindi tutti i fenomeni elettromagnetici coinvolti possono essere studiati correttamente con il modello per campi quasi statici. Gli impianti per la produzione e la distribuzione dell'energia elettrica alla frequenza di 50 Hz, costituiscono una sorgente di campi elettromagnetici nell'intervallo 30-300 Hz.

Ai fini dei calcoli e delle valutazioni nei paragrafi seguenti è stata considerata normale condizione di esercizio quella in cui l'impianto trasferisce alla rete di trasmissione nazionale la massima produzione, cioè 46,5 MW.

Questa ipotesi conduce a valutazioni cautelative con riferimento all'intensità massima della induzione magnetica generata.

### **3.4 Differenza tra campi magnetici indotti da linee elettriche aeree e da cavidotti interrati**

---

Come accennato, l'intensità del campo magnetico generato in corrispondenza di un elettrodotto dipende dall'intensità della corrente circolante nel conduttore; tale flusso risulta estremamente variabile sia nell'arco di una giornata sia su scala temporale maggiore. Per le linee elettriche aeree, il campo magnetico assume il valore massimo in corrispondenza della minima distanza dei conduttori dal suolo, ossia al centro della campata, e decade molto rapidamente allontanandosi dalle linee.

Non c'è alcun effetto schermante nei confronti dei campi magnetici da parte di edifici, alberi o altri oggetti vicini alla linea: quindi all'interno di eventuali edifici circostanti si può misurare un campo magnetico di intensità comparabile a quello riscontrabile all'esterno. Quindi, sia campo elettrico che campo magnetico decadono all'aumentare della distanza dalla linea elettrica, ma mentre il campo elettrico è facilmente schermabile da oggetti quali legno, metallo, ma anche alberi ed edifici, il campo magnetico non è schermabile dalla maggior parte dei materiali di uso comune.

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

- distanza dalle sorgenti (conduttori);
- intensità delle sorgenti (correnti di linea);
- disposizione e distanza tra sorgenti (distanza reciproca 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.

Nel caso di elettrodotti in alta tensione, i valori di campo magnetico, pur al di sotto dei valori di legge imposti, sono notevolmente al di sopra della soglia di attenzione epidemiologica (SAE) che è di  $0.2 \mu\text{T}$ . Infatti, solo distanze superiori a circa 80 m dal conduttore permettono di rilevare un valore così basso del campo magnetico. È necessario notare inoltre che aumentare l'altezza dei conduttori da terra permette di ridurre il livello massimo generato di campo magnetico ma non la distanza dall'asse alla quale si raggiunge la SAE.

**È possibile ridurre questi valori di campo interrando gli elettrodotti.** Questi vengono posti a circa **1.00-1.50 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 fili vengono posti a circa 20 cm l'uno dall'altro e possono assumere disposizione lineare (terna piana) o triangolare (trifoglio).

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 (i circa 80 m suddetti diventano, in questo caso, circa 24).

Altri metodi con i quali ridurre i valori di intensità di campo elettrico e magnetico possono essere quelli di usare "linee compatte", dove i cavi vengono avvicinati tra di loro in quanto questi sono isolati con delle membrane isolanti. Queste portano ad una riduzione del campo magnetico.

I cavi interrati sono quindi un'alternativa all'uso delle linee aeree; essi sono disposti alla profondità di almeno 1.20 metri dal suolo, linearmente sullo stesso piano oppure a triangolo (disposizione a trifoglio).

Confrontando quindi il campo magnetico generato da linee aeree con quello generato da cavi interrati, si può notare che per i cavi interrati l'intensità massima del campo magnetico è più elevata, ma presenta un'attenuazione più pronunciata. In generale si può affermare che l'intensità a livello del suolo immediatamente al di sopra dei cavi di una linea interrata è inferiore a quella immediatamente al di sotto di una linea aerea ad alta tensione. Ciò è dovuto soprattutto ad una maggiore compensazione delle componenti vettoriali associate alle diverse fasi, per effetto della reciproca vicinanza dei cavi, che essendo isolati, possono essere accostati l'uno all'altro, come non può farsi per una linea aerea.

## 4 Fasce di rispetto

---

Come anticipato in premessa, l'impatto elettromagnetico indotto dall'impianto in progetto risulta determinato da:

- linee AT in cavidotti interrati;
- Trasformatori di tensione BT/AT

### 4.1 Cavidotti interrati AT

---

Per quanto riguarda l'impatto elettromagnetico generato dai circuiti AT all'interno dell'impianto, si deve considerare una fascia della larghezza inferiore a 1.00 m intorno alla superficie esterna della torre in acciaio, in quanto, all'interno di questa fascia si avrà un valore di induzione magnetica  $>$  di  $3 \mu\text{T}$ , mentre al suo interno viene rispettato il limite di qualità.

Nei pressi dell'area delimitata dalla recinzione dell'impianto non è prevista la presenza di persone dal momento che l'accesso alla stessa è interdetto al pubblico trattandosi di aree private. È consentito l'accesso alla viabilità, nei pressi dei pannelli ed all'interno dell'area dell'impianto, solo a personale esperto ed addestrato, che comunque accede sporadicamente e per tempi limitati in occasione di manutenzioni programmate e/o straordinarie.

Per quanto concerne i cavi MT interrati che collegano ogni sottocampo, tramite circuiti dedicati, alla stazione di trasformazione il valore di qualità (**induzione magnetica  $<$  di  $3 \mu\text{T}$** ) si raggiunge ad una distanza di circa 1.00 m dal cavo. Nel presente caso, tuttavia, ogni cavo sarà costituito da cavi pre-cordati riuniti ad elica che comportano un'ampiezza minore della fascia di rispetto suddetta (cfr. la fig. seguente). In ogni caso, si ricorda che è comunque previsto l'interramento di ogni cavo ad una profondità di almeno 1.50 m rispetto al piano campagna.

Le aree in cui avverrà la posa dei cavi sono prevalentemente localizzate lungo la viabilità esistente ed aree agricole dove, tra l'altro, non è prevista la permanenza stabile di persone per oltre 4 ore né tantomeno è prevista la costruzione di edifici.

### 4.2 LINEE ELETTRICHE INTERRATE IN AT

---

Oltre a ridurre l'impatto paesaggistico i cavi interrati riducono in maniera significativa anche il campo elettrico ed il campo magnetico. I cavi delle linee interrate sono costituiti generalmente da un conduttore cilindrico, una guaina isolante, una guaina conduttrice ed un rivestimento protettivo.

In genere i cavi di AT interrati vengono posizionati ad una profondità minima di 1,5 metro e possono essere disposti a terna piana (in piano ad alcuni centimetri di distanza l'uno dall'altro) o a trifoglio (ai vertici di un ipotetico triangolo e quindi attaccati l'uno all'altro).

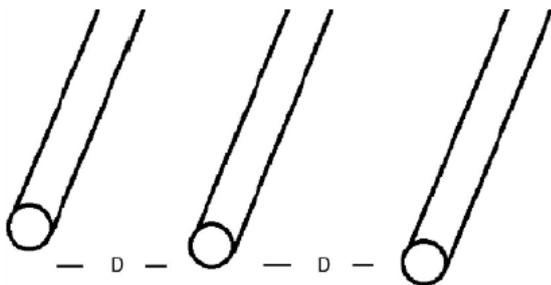


Figura 5: configurazione piana di tre conduttori

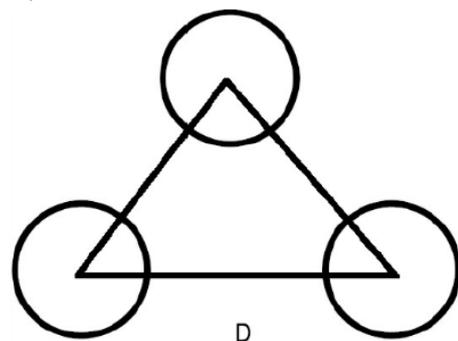


Figura 6: configurazione a trifoglio di tre conduttori

In prossimità delle linee elettriche si generano sempre un campo elettrico ed un campo magnetico a frequenza industriale (50Hz). L'intensità del campo elettrico dipende principalmente dalla tensione della linea e aumenta al crescere della tensione; il suo valore efficace è massimo in prossimità della linea ma decresce rapidamente allontanandosi da essa.

Nel caso di linee elettriche interrato i campi elettrici già al disopra delle linee *sono insignificanti* e sempre minori rispetto alle linee aeree grazie all'effetto schermante del rivestimento del cavo e del terreno. Il *campo magnetico* di una linea elettrica dipende dall'intensità della corrente che circola nei conduttori. Poiché la corrente, come già detto, può variare nell'arco della giornata, della settimana o dell'anno anche l'intensità del campo magnetico varia di conseguenza.

Occorre effettuare un calcolo previsionale del campo di induzione magnetica generato da un cavidotto, anche se interrato, perché non è praticabile una sua schermatura mediante materiali ad alta permeabilità magnetica.

Il campo d'induzione magnetica è regolato dalla legge di Biot-Savart: esso è direttamente proporzionale all'intensità di corrente che circola nei conduttori e inversamente proporzionale alla distanza.

Nel presente progetto occorre tenere presente che il cavidotto è una linea trifase, cioè composto da una terna di correnti di uguale intensità ma sfasate nel tempo. Poiché il campo magnetico, in ogni punto dello spazio circostante, è dato dalla composizione vettoriale dei contributi delle singole correnti alternate, ne deriva un effetto di mutua compensazione di tali contributi tanto maggiore quanto più vicine tra loro sono le sorgenti, fino ad avere una compensazione totale se le tre correnti fossero concentriche.

A differenza delle linee aeree, per le quali la distanza minima è limitata dalla necessaria distanza tra le fasi e dipende dalla tensione di esercizio, durante la posa delle linee in cavo è possibile collocare i conduttori a poche decine di centimetri l'uno dall'altro; questo permette di ottenere un sostanziale abbattimento del campo magnetico già a poca distanza.

#### 4.2.1 Calcolo e verifica dei campi ELF emessi dalla linea interrata

---

I campi ELF oltre che misurati possono essere stimati attraverso l'utilizzo di programmi di calcolo per la cui applicazione è necessaria la conoscenza di alcuni dati della linea elettrica. In particolare serve conoscere le caratteristiche geometriche della linea (diametro dei conduttori e loro reciproca posizione spaziale, distanza da terra), le sue caratteristiche elettriche (tensione, intensità di corrente) e la posizione (distanza e altezza) del punto dove devono essere valutati i campi rispetto ai conduttori della linea.

Il calcolo che segue si rifà direttamente alle indicazioni della norma CEI 211-4 "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche" pubblicata dal Comitato Elettrotecnico Italiano nel luglio 1996. Trascurando il calcolo di verifica del campo elettrico che, per come detto in precedenza, risulta non significativo per le linee elettriche interrato, l'algoritmo di calcolo utilizzato per il calcolo dell'induzione magnetica generata da una linea ha come punto di partenza la legge Biot-Savart che consente di calcolare in un generico punto dello spazio il valore dell'induzione magnetica B prodotta da un conduttore rettilineo percorso da una corrente I attraverso la:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{d} \hat{u}_i \times \hat{u}_r$$

Dove:

d = distanza tra il conduttore e il punto di calcolo;

$\hat{u}_i \times \hat{u}_r$  = prodotto vettoriale dei versori che indicano il verso della corrente e della relativa normale.

Sviluppando la relazione precedente per un insieme di N conduttori rettilinei, orizzontali e paralleli fra loro, e dette  $x_i$  e  $y_i$  le coordinate del conduttore i-esimo, le componenti x e y totali dell'induzione magnetica generata nel punto dello spazio (x, y) dall'intera configurazione di conduttori possono essere espresse attraverso le seguenti relazioni:

$$B_x = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^N I_i \frac{(y_i - y)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

$$B_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^N I_i \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

In prima approssimazione l'induzione magnetica generata da un conduttore singolo si può calcolare con la seguente formula (Biot e Savart):

$$B = \frac{0,2 \cdot I}{r}$$

dove B rappresenta l'induzione magnetica misurata in micro Tesla ( $\mu\text{T}$ ), I la corrente in ampere (A) e r la distanza in metri (m).

Per una linea trifase costituita da tre conduttori piani, tipicamente presente in ambito industriale, l'andamento rispetta la seguente formula:

$$B = \frac{0,35 \cdot I \cdot D}{r^2}$$

dove **D** è la distanza tra i due conduttori in metri.

Se i tre conduttori sono posati nella configurazione a trifoglio l'induzione magnetica si può calcolare con la seguente formula:

$$B = \frac{0,25 \cdot I \cdot D}{r^2}$$

Per il cavo AT di connessione alla SE RTN per posa interrata a 1,5m di profondità si ottiene le curva di distribuzione del campo elettromagnetico come riportato nelle figure che seguono:

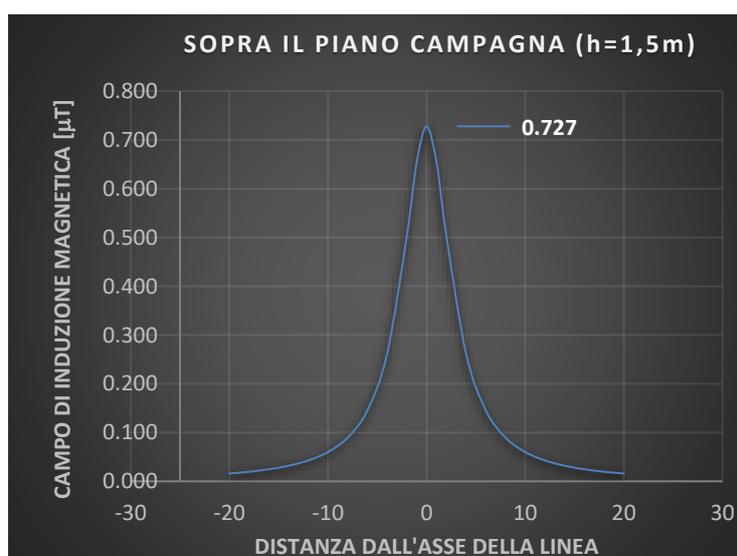


Figura 7: campo elettromagnetico a 1,5 m sopra il suolo

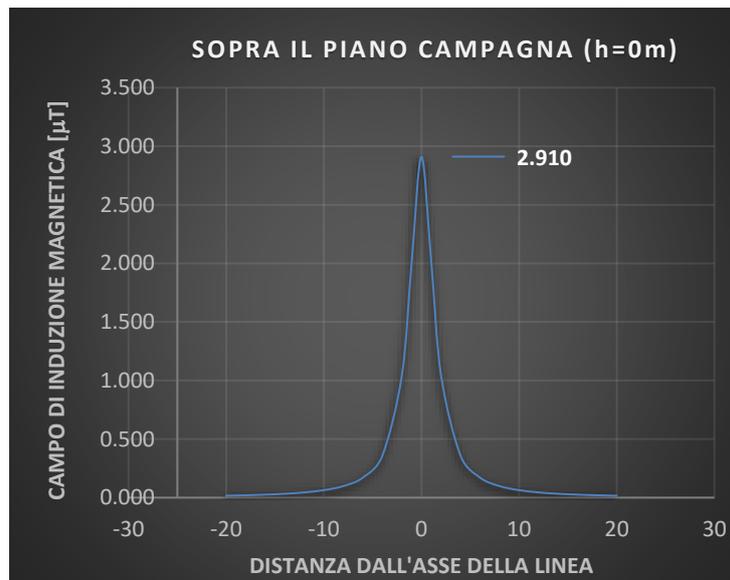


Figura 8: campo elettromagnetico a 1,5 m sopra il suolo

Per sorgenti costituite da avvolgimenti, come per i trasformatori i valori di induzione magnetica seguono l'inverso del cubo della distanza:

$$B = n \cdot \frac{0,20 \cdot I \cdot D}{r^3}$$

#### 4.2.2 Condizioni di carico ed ipotesi di calcolo

La connessione all'interno del campo delle cabine di trasformazione del generatore fotovoltaico è realizzata attraverso tre conduttori unipolari avvolti ad elica in rame, con tipo di isolante ad alto modulo elastico, schermati sotto guaina di PVC e disposti in piano alla profondità di circa 1,5 m.

Il *campo elettrico* risulta ridotto in maniera significativa per l'effetto combinato dovuto alla speciale guaina schermante del cavo ed alla presenza del terreno che presenta una costante dielettrica elevata.

Per i motivi sopra elencati, il campo elettrico risulta ampiamente entro i limiti di legge e non è necessario considerarlo nei calcoli e nei grafici che seguono.

Per il calcolo previsionale del campo d'induzione magnetica generato dalla linea, si è utilizzato un modello che si basa sul modello matematico bidimensionale dei conduttori rettilinei, paralleli ed indefiniti, secondo quanto indicato dalla Norma CEI 211-4.

Il terreno è stato supposto completamente permeabile al campo magnetico. L'utilizzo di conduttori ad elica, nella realizzazione della linea, permette di ottenere un ulteriore abbattimento del campo magnetico e costituisce una condizione migliore rispetto al modello considerato.

Nella figura seguente è schematizzato il tipo di posa dei cavi utilizzato nella simulazione (situazione peggiorativa)

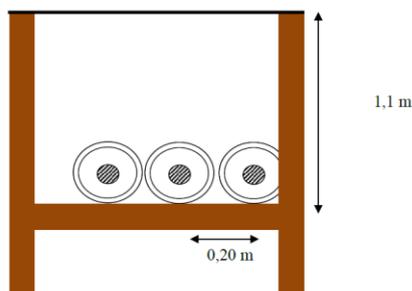


Figura 9: scema di posa per la simulazione

Rovesciando la logica, è anche possibile calcolare la distanza  $R'$  dal baricentro dei conduttori, alla quale l'induzione magnetica si riduce al valore dell'obiettivo di qualità di  $3 \mu\text{T}$ :

$$R' = 0,34 \cdot \sqrt{S \cdot I}$$

Per il cavo AT di connessione dell'impianto alla SET, assumendo la posa di cavi unipolari a triangolo, la distanza dall'asse della linea a livello del suolo ( $h=0$ )  $R_0$  (figura), oltre la quale l'induzione magnetica scende al di sotto dell'obiettivo di qualità di  $3 \mu\text{T}$  ( $d$  è la profondità di posa):

$$R_0 = \sqrt{0,082 \cdot P \cdot I - d^2}$$

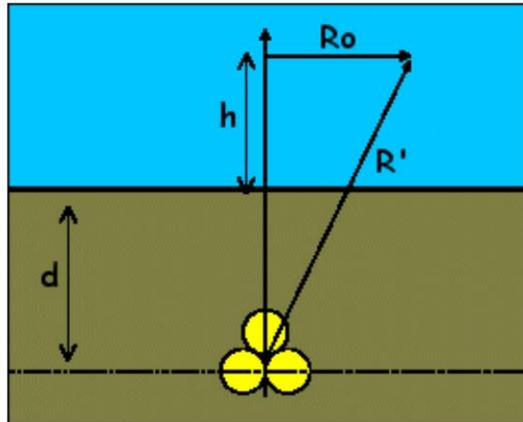


Figura 10: Schema e distanze di cavi interrati posati a triangolo (CEI 106-11)

Sulla base dei dati di progetto

- Tensione nominale della linea: 36kV
- Potenza massima cavidotto esterno: 15 MW
- Corrente massima cavidotto esterno: 267,29A

ad una profondità di 1,5 m con distanza fra i cavi di circa 0,10 m si ottiene:

$$R_0 = \sqrt{0,082 \cdot 0,1 \cdot 267,29 - 1,2^2} = 0,87\text{m}$$

Per le considerazioni sopra svolte, per le indicazioni che vengono dalla letteratura scientifica e per le risultanze di calcolo, si può affermare che il costruendo cavidotto a 36 kV darà contributi in termini di campo elettrico e di induzione magnetica che nei riguardi delle abitazioni più prossime risulteranno al di sotto dei limiti di esposizione dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità di cui al DPCM 8 luglio 2003 e che entro una fascia di 3 m non risultano risiedere ricettori sensibili.

### 4.3 Cabine di trasformazione interne al campo fotovoltaico e cabine di smistamento

Data la distanza assicurata in fase di progetto fra i trasformatori posizionati nella Cabine A e le abitazioni circostanti più prossime, comunque molto lontane, si può ritenere trascurabile il contributo di tali apparati elettrici in riferimento a campi elettrici e magnetici. L'impianto, inoltre, non è stabilmente presidiato, la presenza dell'uomo nelle vicinanze delle cabine di trasformazione è legata unicamente agli interventi di manutenzione ordinaria e/o straordinaria che, in ogni caso, sono effettuate con impianto non in produzione, quando il campo elettromagnetico generato dalla corrente prodotta dal generatore è nulla.

### 4.3.1 Possibili interventi di riduzione del campo elettromagnetico

---

La guida CEI 106-12 prende in considerazione due metodi di mitigazione dei campi magnetici generati dalle cabine, indicando nel primo sicuramente la scelta più efficace e preferibile:

- a) Agire sulla configurazione e componentistica della cabina eseguendo una o più delle seguenti azioni durante la messa in opera o la ristrutturazione della cabina:
- **Allontanare le sorgenti di campo più pericolose** (quadri e relativi collegamenti al trasformatore) dai muri della cabina confinanti con l'ambiente esterno ove si vuole ridurre il campo. Infatti i collegamenti BT trasformatorequadro sono in genere quelli interessati dalle correnti e quindi dai campi magnetici più elevati;
  - **Avvicinare le fasi dei collegamenti** utilizzando preferibilmente cavi cordati;
  - Disporre in modo ottimale le fasi, nel caso in cui si utilizzino per esse più cavi unipolari in parallelo;
  - **Utilizzare unità modulari compatte;**
  - Nel caso in cui il collegamento trasformatore-quadro BT fosse ancora realizzato con piattina di rame nudo, sostituirlo con cavi posati possibilmente al centro della cabina;
  - **Utilizzare cavi tripolari cordati, piuttosto che cavi unipolari, per gli eventuali collegamenti entra-esce in Alta Tensione.** Infatti, in particolare i circuiti che collegano le linee AT ai relativi scomparti di cabina (nel caso appunto di collegamento in "entra-esce" della cabina alla rete) sono percorsi da una corrente che può essere dello stesso ordine di grandezza di quelle dei circuiti di bassa tensione. Meno importanti, dal punto di vista della produzione di campi elettromagnetici, sono invece i collegamenti tra il trasformatore ed il relativo scomparto del quadro AT; in questo caso infatti la corrente è solamente di qualche decina di ampere e, generalmente, il percorso dei cavi interessa la parte più interna della cabina;
  - Posizionare i trasformatori in modo che i passanti di alta tensione (correnti basse) siano rivolti verso la parete della cabina ed i passanti di bassa tensione (correnti alte) siano invece rivolti verso il centro della cabina (questo ovviamente se i problemi sono oltre le pareti e non sopra il soffitto o sotto il pavimento).
  - **Utilizzare preferibilmente trasformatori in olio**, invece che in resina, poiché la cassa in ferro rende trascurabili i flussi dispersi nell'ambiente circostante, producendo un'efficace azione schermante

In ogni caso, anche durante la produzione dell'impianto fotovoltaico, nell'ipotesi sebbene remota che si riscontrassero valori di campo magnetico superiori ai limiti di legge, si ricorrerà alla tecnica della schermatura attraverso gli schermi magnetici o gli schermi conduttivi. Nel primo caso, l'obiettivo della schermatura è quello di distogliere il flusso magnetico dal suo percorso, per convogliarlo in zone non presidiate da persone, mentre nel secondo, attraverso gli schermi conduttivi, si contrasta il flusso esistente con un altro contrario. La schermatura può essere limitata alle sorgenti (soprattutto cavi e quadri BT) o estesa all'intero locale cabina.

### 4.3.2 Distanza di prima approssimazione per cabine di trasformazione con installato un solo trasformatore

---

Le cabine di trasformazione hanno la funzione di alzare la bassa tensione di 690 volt alla tensione di utilizzo di 36 kV. La sorgente che genera i campi magnetici all'interno di una cabina di trasformazione è essenzialmente il lato bassa tensione del trasformatore.

Anche per le cabine di trasformazione viene definita una DPA. Ai sensi del Decreto 29 maggio 2008 la fascia di rispetto deve essere 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 ( $x_{\text{massimo}} = 0,043 \text{ m}$ ) del cavo applicando la seguente relazione:

$$DPA = \sqrt{I \cdot 0,40942 \cdot x^{0,5242}}$$

La D.P.A. poi va considerata direttamente dai muri della cabina stessa.

La relazione di cui sopra è valida solo per trasformatori con potenza massima pari a 630 kVA e per un solo trasformatore collocato all'interno della cabina. Si precisa che la D.P.A. va considerata dai muri della cabina. Il decreto del 29 maggio non specifica come calcolare la D.P.A. per potenze installate superiori a 630 kVA o nel caso sia presente più di un trasformatore, questi casi vengono definiti come "complessi".

Nel caso si debba stimare la D.P.A. per un solo trasformatore di potenza superiore a 630 kVA si può utilizzare la formula:

$$DPA = \sqrt{0,11 \cdot I \cdot d}$$

ipotizzando che tutta la corrente del lato bassa tensione (690 V) sia canalizzata in un unico cavo collocato adiacente il muro interno della cabina. Come valore di corrente (I) occorre inserire la massima corrente circolante sul lato bassa tensione del trasformatore. La corrente si può calcolare con la formula seguente in funzione della potenza del trasformatore (P in kVA):

$$I = \frac{P}{0,69 \cdot \sqrt{3}}$$

La distanza d in metri (diametro conduttori) si può stimare se non conosciuta considerando la massima corrente circolante in un cavo in funzione della sezione fissata pari a 1,3 A/mm<sup>2</sup>:

$$d = 0,002 \cdot \sqrt{\frac{I}{4}}$$

Compattando le relazioni precedenti si ottiene la formula:

$$DPA = \sqrt{0,11 \cdot \left(\frac{P}{Vn \cdot \sqrt{3}}\right)^{3/2} \cdot 0,002 \cdot \sqrt{\frac{1}{4}}} = \sqrt{0,00011 \cdot \left(\frac{P}{Vn \cdot \sqrt{3}}\right)^{3/2}}$$

Poichè nella cabina di trasformazione più grande sono installate power station con trasformatore da 9.000 kVA, con doppio secondario (4500kVA) a 690V, la D.P.A. calcolata con la formula precedente risulta:

$$DPA = \sqrt{0,00011 \cdot \left(\frac{4500}{0,69 \cdot \sqrt{3}}\right)^{3/2}} = \mathbf{5,04 \text{ m}}$$

### 4.3.3 Distanza di prima approssimazione per quadri elettrici

---

I quadri elettrici hanno la funzione di suddividere e comandare le linee elettriche funzionali all'impianto fotovoltaico. Conclusioni

In base alle considerazioni ed ai calcoli eseguiti, non si riscontrano problematiche particolari relative all'impatto elettromagnetico dei componenti dell'impianto fotovoltaico in progetto in merito all'esposizione umana ai campi elettrici e magnetici.

Le valutazioni effettuate confermano la rispondenza alle norme vigenti dell'impianto dal punto degli effetti del campo elettromagnetico sulla salute umana.