



REGIONE
BASILICATA



COMUNE DI
BERNALDA



PROVINCIA DI
MATERA

PROGETTO DEFINITIVO

Lavori di realizzazione di un parco agro-fotovoltaico denominato "Bernalda 1" con potenza in immissione pari a 14.1 MW integrato con un sistema di accumulo e relative opere di connessione

Titolo elaborato

A.8. Relazione tecnica specialistica sull'impatto elettromagnetico

Codice elaborato

F0538BR08A

Scala

-

Riproduzione o consegna a terzi solo dietro specifica autorizzazione.

Progettazione



F4 ingegneria srl

Via Di Giura - Centro direzionale, 85100 Potenza

Tel: +39 0971 1944797 - Fax: +39 0971 55452

www.f4ingegneria.it - f4ingegneria@pec.it

Il Direttore tecnico
(ing. Mauro MARELLA)



Gruppo di lavoro

Ing. Giorgio ZUCCARO

Ing. Mauro MARELLA

Dott. for. Luigi ZUCCARO

Ing. Cristina GUGLIELMI

Ing. Manuela NARDOZZA

Ing. Giuseppina D'AGROSA GRIECO

Dr. agr. Maria Rosaria MONTANARELLA

Vito PIERRI



Società certificata secondo le norme UNI-EN ISO 9001:2015 e UNI-EN ISO 14001:2015 per l'erogazione di servizi di ingegneria nei settori: civile, idraulica, acustica, energia, ambiente (settore IAF: 34).

Consulenze specialistiche

Committente

APOLLO Solar 1 srl

Viale della Stazione 7, 39100 Bolzano (BZ)

Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
Aprile 2023	Prima emissione	MNA	GZU	MMA

Relazione tecnica specialistica sull'impatto elettromagnetico

Sommario

1	Premessa	4
2	Definizioni	5
2.1	Rete elettrica	5
2.2	Impianto fotovoltaico	5
3	Descrizione generale del progetto	8
3.1	Dati generale del progetto	8
3.2	Normativa di riferimento nazionale e regionale	8
3.3	Dimensionamento cavi	11
4	Valutazione dei campi elettrici e magnetici a bassa frequenza (ELF)	14
4.1	Definizioni e unità di misura	14
4.2	Valori di induzione magnetica generati da un filo isolato	15
4.3	Valori limite	16
4.4	Differenza tra campi magnetici indotti da linee elettriche aeree e da cavidotti interrati	17
5	Fasce di rispetto	19
5.1	Cavidotti interrati AT	19
5.2	Linee elettriche interrate	19
5.2.1	Calcolo e verifica dei campi ELF emessi dalla linea interrata	20
5.3	Cabine di trasformazione interne al campo fotovoltaico	23
5.3.1	Possibili interventi di riduzione del campo elettromagnetico	23
5.3.2	Distanza di prima approssimazione per cabine di trasformazione con installato un solo trasformatore	24
6	Conclusioni	26

1 Premessa

Il presente progetto definitivo si riferisce alla realizzazione di un impianto di energia rinnovabile da fonte solare, a carattere agrivoltaico, nel comune di Bernalda (MT). La Soluzione Minima Tecnica Generale (STMG) prevede il collegamento in antenna a 36 kV su una futura Stazione Elettrica (SE) della RTN a 150/36 kV nel comune di Montescaglioso (MT), come definito nel preventivo di connessione con codice pratica 202202508.

Le opere in progetto sono proposte dalla società Apollo Solar S.r.l. con sede in Via della Stazione 7, 39100 Bolzano (BZ).

Nello specifico, l'impianto sarà costituito da 21450 moduli fotovoltaici suddivisi in 4 sottocampi, in cui i moduli sono organizzati in stringhe ciascuna da 30 moduli o coppie di stringhe da 15 moduli. La potenza nominale dell'impianto è pari a 14.1 MW (lato AC).

Si precisa, inoltre, che l'impianto in oggetto si caratterizza come un impianto "agrivoltaico", ovvero un impianto che permette di preservare l'attività di coltivazione agricola o pastorale, garantendo una buona produzione energetica. La progettazione è stata perseguita tenendo conto delle recenti Linee Guida in materia di impianti agrivoltaici del Ministero della Transizione Ecologica (Mite - attuale Mase) del giugno 2022.

Pertanto, il progetto è perseguito in coerenza con le indicazioni del Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (**PNIEC**) e tenendo conto del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (**PNRR**, legge 29 luglio 2021, n.108).

La presente relazione generale, in particolare, è conforme agli allegati tecnici del Piano di Indirizzo Energetico Ambientale Regionale (PIEAR) della Regione Basilicata ex DGR 2260 del 29.12.2010 e s.m.i. perché descrive in dettaglio i diversi elementi progettuali dell'impianto fotovoltaico nonché il loro dimensionamento ed i criteri di scelta utilizzati.

A tal proposito si precisa che tutti gli impianti previsti rappresentano la miglior soluzione installativa emergente dalla valutazione del rapporto qualità/prezzo e dell'oggettiva funzionalità e flessibilità degli impianti, data anche la particolare natura della struttura in oggetto.

La validità delle soluzioni proposte sotto il profilo della sicurezza e della conformità normativa è vincolata all'impiego di materiali recanti la marcatura CE ed il marchio IMQ, integri, posati secondo le indicazioni del costruttore e in ogni caso strettamente dipendente dalle condizioni d'uso e di conservazione in efficienza dello stesso. Le installazioni da porre in opera saranno verificate con adeguata strumentazione prima dell'entrata in funzione, coerentemente con quanto disposto dalla normativa vigente.

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

2 Definizioni

2.1 Rete elettrica

- **Distributore:** persona fisica o giuridica responsabile dello svolgimento di attività e procedure di distribuzione di cui è proprietaria.
- **Punto di consegna:** il punto di confine tra la rete del distributore e la rete di utente, dove l'energia scambiata con la rete del distributore viene contabilizzata e dove avviene la separazione funzionale tra rete del distributore e la rete di utente.
- **Punto di consegna per utenti attivi:** il punto di consegna per gli utenti attivi si trova, dal punto di vista della rete del distributore, a monte dell'impianto di misura: quest'ultimo viene realizzato a carico dell'utente attivo che ne ha la completa responsabilità. Il punto di consegna è costituito dal confine tra impianto di rete per la connessione e impianto di utenza per la connessione. Tale punto è posizionato generalmente in prossimità del confine di proprietà degli impianti. Qualora l'impianto di rete per la connessione preveda sistemi di protezione, comando e controllo, deve essere previsto un fabbricato nel quale trovino posto i sistemi di protezione, comando e controllo delle apparecchiature ed equipaggiamenti funzionali al collegamento. Qualora il suddetto fabbricato sia realizzato in area di proprietà dell'Utente, l'accesso in sicurezza a tale fabbricato da parte del distributore deve essere garantito in ogni momento e senza preavviso.
- **Punto di misura:** il punto di misura è il punto in cui è misurata l'energia elettrica immessa e/o prelevata in rete.
- **Punto di connessione:** punto sulla rete del distributore dal quale, in relazione a parametri riguardanti la qualità del servizio elettrico che deve essere reso o richiesto, è alimentato l'impianto dell'utente.
- **Utente:** soggetto che utilizza la rete del distributore per cedere o acquistare energia elettrica.
- **Utente attivo:** soggetto che converte l'energia primaria in energia elettrica mediante impianti di produzione allacciati alla Rete di distribuzione.

2.2 Impianto fotovoltaico

- **Angolo di inclinazione (o di tilt):** angolo di inclinazione del piano del dispositivo fotovoltaico rispetto al piano orizzontale (da IEC/TS 61836).
- **Angolo di orientazione (o di azimut):** l'angolo di orientazione del piano del dispositivo fotovoltaico rispetto al meridiano corrispondente. In pratica, esso misura lo scostamento del piano rispetto all'orientazione verso sud (per i siti nell'emisfero terrestre settentrionale) o verso nord (per i siti nell'emisfero meridionale). Valori positivi dell'angolo di azimut indicano un orientamento verso ovest e valori negativi indicano un orientamento verso est (CEI EN 61194).
- **Campo fotovoltaico:** insieme di tutte le schiere di moduli fotovoltaici in un sistema dato (CEI EN 61277).
- **Cella fotovoltaica:** dispositivo fotovoltaico fondamentale che genera elettricità quando viene esposto alla radiazione solare (CEI EN 60904-3). Si tratta

sostanzialmente di un diodo con grande superficie di giunzione, che esposto alla radiazione solare si comporta come un generatore di corrente, di valore proporzionale alla radiazione incidente su di esso.

- **Condiziona di Prova Standard (STC):** comprendono le seguenti condizioni di prova normalizzate (CEI EN 60904-3) o Temperatura di cella: $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$; o Irraggiamento: 1000 W/m^2 , con distribuzione spettrale di riferimento (massa d'aria AM 1.5).
- **Condizioni di utilizzo a temperatura ambiente (NOCT):** comprende le seguenti condizioni ambientali per calcolare l'influenza della temperatura sulla potenza nominale o Irraggiamento solare: 800 W/m^2 ; o Temperatura ambiente (dell'aria): 20 °C ; o Velocità dell'aria sul retro del modulo: 1 m/s ; o Modulo funzionante a vuoto.
- **Dispositivo di generatore (DDG):** apparecchiatura di manovra e protezione la cui apertura (comandata da un apposito sistema di protezione) determina la separazione del gruppo di generazione.
- **Dispositivo generale di utente (DG):** apparecchiatura di protezione, manovra e sezionamento la cui apertura (comandata dal Sistema di Protezione Generale) assicura la separazione dell'intero impianto dell'Utente dalla rete del Distributore. Nel caso di impianto che presenti un'unica linea di alimentazione (immediatamente a valle del cavo di collegamento) il DG è unico.
- **Dispositivo di interfaccia (DDI):** una (o più) apparecchiature di manovra la cui apertura (comandata da un apposito sistema di protezione) assicura la separazione dell'impianto di produzione dalla rete, consentendo all'impianto di produzione stesso l'eventuale funzionamento in isola sui carichi privilegiati.
- **Effetto fotovoltaico:** fenomeno di conversione diretta della radiazione elettromagnetica (generalmente nel campo della luce visibile e, in particolare, della radiazione solare) in energia elettrica mediante formazione di coppie elettrone-lacuna all'interno di semiconduttori, le quali determinano la creazione di una differenza di potenziale e la conseguente circolazione di corrente se collegate ad un circuito esterno.
- **Gruppo di conversione della corrente continua in corrente alternata (o inverter):** apparecchiatura, tipicamente statica, impiegata per la conversione in corrente alternata della corrente continua prodotta dal generatore fotovoltaico.
- **Impianto (o sistema) fotovoltaico:** impianto di produzione di energia elettrica, mediante l'effetto fotovoltaico; esso è composto dall'insieme di moduli fotovoltaici (Campo fotovoltaico) e dagli altri componenti, tali da consentire di produrre energia elettrica e fornirla alle utenze elettriche e/o di immetterla nella rete del distributore.
- **Inseguitore della massima potenza (MPPT):** dispositivo di comando dell'inverter tale da far operare il generatore fotovoltaico nel punto di massima potenza. Esso può essere realizzato anche con un convertitore statico separato dall'inverter, specie negli impianti non collegati ad un sistema in c.a.
- **Modulo fotovoltaico:** il più piccolo insieme di celle fotovoltaiche interconnesse e protette dall'ambiente circostante (CEI EN 60904-3).
- **Potenza nominale (o massima, o di picco, o di targa) di un generatore fotovoltaico:** potenza apparente massima a cui un generatore elettrico o un trasformatore possono funzionare con continuità in condizioni specificate (kVA). Per generatori tradizionali ed eolici, come potenza nominale può essere indicata la potenza attiva

del gruppo di generazione a $\cos\phi$ nominale (turbina, convertitore, ecc.) (kW). Nel caso di generatori FV, la potenza attiva massima erogabile è limitata dalla potenza nominale dell'inverter, qualora questa sia minore della somma delle potenze STC dei moduli FV.

- **Potenza effettiva di un generatore fotovoltaico:** potenza di picco del generatore fotovoltaico (espressa in Wp), misurata ai morsetti in corrente continua dello stesso e riportata alle Condizioni di Prova Standard (STC) secondo definite procedure (CEI EN 61829).
- **Potenza prodotta da un impianto fotovoltaico:** potenza di un impianto fotovoltaico (espressa in kW) misurata all'uscita dal gruppo di conversione della corrente continua in corrente alternata, resa disponibile alle utenze elettriche e/o immessa nella rete del distributore.
- **Stringa fotovoltaica:** insieme di moduli fotovoltaici collegati elettricamente in serie per ottenere la tensione d'uscita desiderata.

3 Descrizione generale del progetto

3.1 Dati generale del progetto

Il sito di realizzazione dell'impianto fotovoltaico, ricadente nel territorio comunale di Bernalda (MT), presenta le seguenti coordinate:

- 40° 26'31.87" N;
- 16°39'26.73" E;
- Altitudine: circa 198 m s.l.m.

Le opere di connessione interessano il limitrofo comune di Montescaglioso per il punto di connessione finale.

Dal punto di vista catastale, le aree interessate sono:

- Foglio 1 particella 183, comune di Bernalda, per quanto riguarda l'impianto fotovoltaico;
- Foglio 83 particella 248, comune di Montescaglioso, per quanto riguarda la sottostazione.

L'impianto fotovoltaico in progetto è costituito principalmente dai seguenti elementi:

- **Pannelli fotovoltaici;**
- **Strutture metalliche di sostegno ad inseguimento;**
- **Cabine di sottocampo per la trasformazione MT/BT;**
- **Conduttori elettrici e cavidotti;**
- **Cabina di raccolta;**
- **Sistema di accumulo;**
- **Recinzione perimetrale e cancelli di accesso;**
- **Interventi di riequilibrio e reinserimento ambientale.**

I pannelli trasformano l'irraggiamento solare in corrente elettrica continua. Essi saranno collegati in serie formando una "stringa" che, a sua volta, sarà collegata in parallelo con le altre per convogliare tutta l'energia prodotta verso gli inverter che la trasformano in corrente alternata. Da qui l'energia verrà trasferita mediante conduttori elettrici interrati alle cabine di campo che fungeranno anche da "cabine di trasformazione" in grado di incrementare il voltaggio fino alla media tensione prima della connessione al punto di consegna finale. L'impianto nel complesso è costituito da 4 sottocampi. Il circuito di uscita dal campo 1 verrà collegato in entra esci alla cabina di distribuzione del campo 2 da cui avrà origine un solo circuito in uscita verso la cabina del campo 3 e così via fino alla cabina di distribuzione del campo 4.

L'impianto, inoltre, è caratterizzato da una potenza di picco installata in corrente continua di 14.4 MW, mentre la potenza totale immessa in rete è pari a 14.1 MW.

A valle dell'ultima cabina di campo, l'energia verrà trasferita mediante un unico cavidotto esterno alla sottostazione di condivisione e trasformazione e, da qui, alla Rete di Trasmissione Nazionale (RTN) tramite il punto di connessione.

Al fine di ridurre al minimo il consumo di suolo legato all'installazione dei moduli fotovoltaici ed incrementare la qualità del suolo, nella fattispecie mediante apporto di carbonio, i lotti di interesse saranno convertiti ad attività agricole, come dettagliato nel seguito e negli elaborati di progetto.

3.2 Normativa di riferimento nazionale e regionale

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;
- CEI PAS 82-93 – Impianti agrivoltaici;
- 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, elettrodoto, 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;
- *elettrodoto*: 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.

3.3 Dimensionamento cavi

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

Per il collegamento delle cabine di campo dei campi fotovoltaici si prevede la realizzazione di linee a 36 kV a mezzo di collegamenti del tipo "entra-esce", mediante cavi del tipo RG7H10R-26/45 kV con conduttore in rame.

Il cavidotto di connessione allo stallo a 36 kV, di lunghezza pari a circa 4.77 km, sarà realizzato con cavo tripolare RG7H10R – 26/45 kV con conduttore in rame.

L'isolamento sarà garantito mediante guaina termo-restringente.

I cavi verranno posati ad una profondità di circa 130 cm per il cavo esterno e di 100 cm per quello interno, 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 obbligatoria che avrà una larghezza di 60-100 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).

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.

Per il calcolo della portata ci si riferisce alla tabella CEI UNEL 35027 fasc. 9738 "Cavi di energia per tensione nominale U da 1 kV a 30 kV. Portata di corrente in regime permanente – Posa in aria ed 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.

$$I_z = I_0 \times k$$

Dove:

I_0 = portata per posa interrata per cavi di tipo ARE4H5EE 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 riporta, di seguito, una tabella riepilogativa dei cavi in progetto:

Lavori di realizzazione di un parco agro-fotovoltaico denominato "Bernalda 1" con potenza in immissione pari a 14.1 MW integrato con un sistema di accumulo e relative opere di connessione

A.8. Relazione tecnica specialistica sull'impatto elettromagnetico

TIPO CAVO			RAME RG7H10R - 26\45 kV tripolare	RAME RG7H10R - 26\45 kV tripolare	RAME RG7H10R - 26\45 kV tripolare	RAME RG7H10R - 26\45 kV tripolare	RAME RG7H10R - 26\45 kV tripolare	RAME RG7H10R - 26\45 kV tripolare	RAME RG7H10R - 26\45 kV tripolare
Tensione nominale	Vn	kV	36	36	36	36	36	36	36
	Cosfi		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
	Sinfi	si	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Potenza nominale	Pn	MW	7.00	3.00	4.00	4.00	4.00	6.67	14.40
Corrente di impiego	I _b	A	124.74	53.46	71.28	71.28	71.28	118.78	256.60
sezione cavo	S	mm ²	95	95	95	95	95	95	120
Lunghezza linea	L	m	81	301	130	123	205	54	4,770
Resistenza della linea	R _L	Ω / km	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.153
Reattanza della linea	X _L	Ω / km	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140
Caduta di tensione	ΔV	V	4.1	6.5	3.8	3.6	5.9	2.6	421.3
	ΔV	%	0.01%	0.02%	0.01%	0.01%	0.02%	0.01%	1.17%
PORTATA			VERIFICATO	VERIFICATO	VERIFICATO	VERIFICATO	VERIFICATO	VERIFICATO	VERIFICATO
Materiale isolamento			EPR	EPR	EPR	EPR	EPR	EPR	EPR
Portata nominale	I ₀	A	288	288	288	288	288	288	327
Temperatura terreno	T	°C	25	25	25	25	25	25	25
terne		nr	2	2	2	2	2	1	1
distanza		m	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Profondità di posa		m	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5
Resistività termica		K*m/W	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Fattori di correzione									
K1	ktt		0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
K2	kd		0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	1.00	1.00
K3	kp		0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.93
K4	kr		1	1	1	1	1	1	1
Portata cavo	I _z	A	242	242	242	242	242	263	286

4 Valutazione dei campi elettrici e 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.

4.1 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.

Lavori di realizzazione di un parco agro-fotovoltaico denominato "Bernalda 1" con potenza in immissione pari a 14.1 MW integrato con un sistema di accumulo e relative opere di connessione

A.8. Relazione tecnica specialistica sull'impatto elettromagnetico

Tabella 1: 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.

4.2 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).

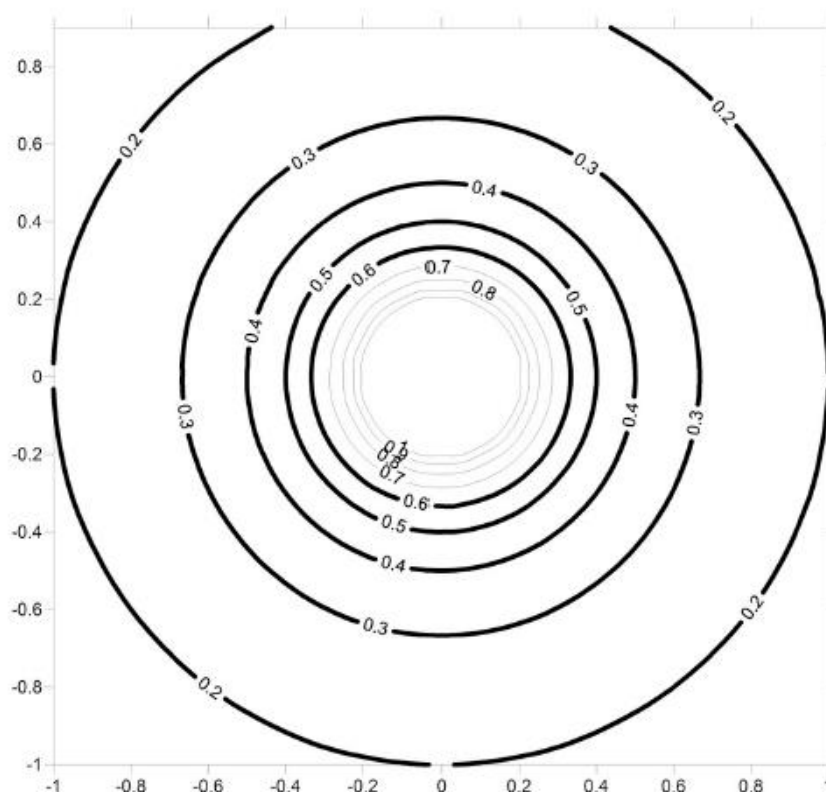


Figura 1: Valori di induzione magnetica generati da un filo isolato

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

4.3 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 μT 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 μT , 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 μT 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 μT**) 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 μ 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 abbatta 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.

4.4 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 aggiuntivi (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.

5 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 MT/BT.

5.1 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, 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.

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 1.30 m rispetto al piano campagna esternamente al campo.

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.

5.2 Linee elettriche interrate

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 interrati vengono posizionati ad una profondità minima di 1.30 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).

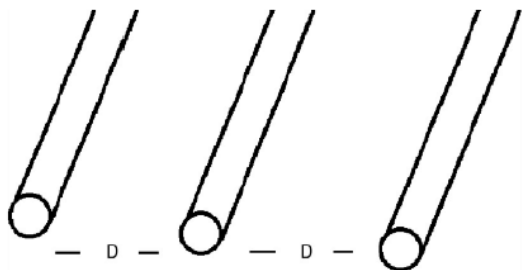


Figura 2: configurazione piana di tre conduttori

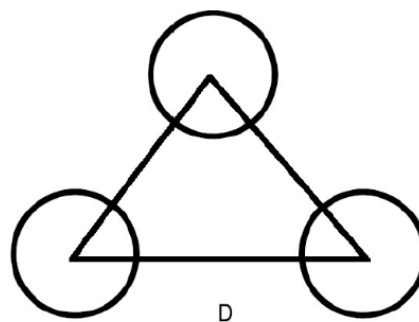


Figura 3: configurazione a trifoglio di tre conduttori

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.

5.2.1 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 (μT), 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:

$$B = \frac{0.25 \cdot I \cdot D}{r^2}$$

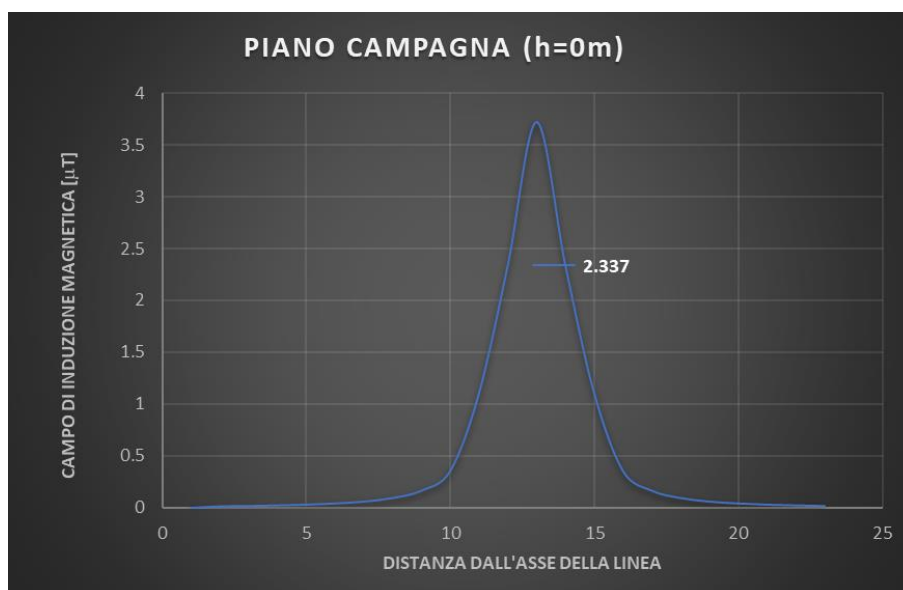
Per il cavo AT di connessione allo stallo di 36 kV, con una potenza massima trasferita di 14.1MW (circuito 1), per posa interrata a 1.3 m di profondità si ottiene la curva di distribuzione del campo elettromagnetico come riportato nelle figure che seguono:

Lavori di realizzazione di un parco agro-fotovoltaico denominato "Bernalda 1" con potenza in immissione pari a 14.1 MW integrato con un sistema di accumulo e relative opere di connessione

A.8. Relazione tecnica specialistica sull'impatto elettromagnetico

TABELLA RIEPILOGATIVA DEI VALORI PREVISTI			
TIPO DI POSA		A TRIFOGLIO	
Tensione trasporto		KV	36
cos fi			0.9
Potenza nominale		MW	14.40
VALORE DELLA CORRENTE		A	256.60
DISTANZA DEI CONDOTTI		m	0.1
PROFONDITA' DI POSA		m	1.3
SUL PIANO CAMPAGNA		SOPRA IL PIANO CAMPAGNA	
h=0m		h	2
DISTANZA DALL'ASSE DELLA LINEA	CAMPO DI INDUZIONE MAGNETICA	DISTANZA DALL'ASSE DELLA LINEA	CAMPO DI INDUZIONE MAGNETICA
[m]	[μ T]	[m]	[μ T]
-20	0.016	-20	0.015
-18	0.019	-18	0.019
-16	0.024	-16	0.024
-14	0.032	-14	0.030
-12	0.043	-12	0.041
-10	0.062	-10	0.057
-8	0.096	-8	0.084
-6	0.167	-6	0.134
-4	0.355	-4	0.234
-2	1.105	-2	0.422
-1	2.337	-1	0.529
0	3.719	0	0.577
1	2.337	1	0.529
2	1.105	2	0.422
4	0.355	4	0.234
6	0.167	6	0.134
8	0.096	8	0.084
10	0.062	10	0.057
12	0.043	12	0.041
14	0.032	14	0.030
16	0.024	16	0.024
18	0.019	18	0.019
20	0.016	20	0.015





5.3 Cabine di trasformazione interne al campo fotovoltaico

Data la distanza assicurata in fase di progetto fra i trasformatori posizionati nelle cabine di campo 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.

5.3.1 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 trasformatore quadro 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.

5.3.2 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 800 V per l'impianto fotovoltaico e di 690 V per l'impianto di accumulo 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 (massimo = 0.043 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:

$$DPA = \sqrt{0.11 \cdot I \cdot d}$$

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):

$$I = \frac{P}{Vn \cdot \sqrt{3}}$$

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/mm²:

$$d = 0.002 \cdot \sqrt{\frac{I}{4}}$$

Compattando le relazioni precedenti si ottiene la formula:

$$DPA = \sqrt{0.11 \cdot \left(\frac{P}{Vn \cdot \sqrt{3}}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot 0.002 \cdot \sqrt{\frac{1}{4}}} = \sqrt{0.00011 \cdot \left(\frac{P}{Vn \cdot \sqrt{3}}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

Nel caso dell'impianto fotovoltaico sono installati trasformatori con potenza massima 4.000 kVA, con secondario a 800V, quindi la D.P.A. calcolata con la formula precedente risulta:

$$DPA = \sqrt{0.00011 \cdot \left(\frac{4000}{0.69 \cdot \sqrt{3}}\right)^{\frac{3}{2}}} = \mathbf{4.62 \text{ m}}$$

6 Conclusioni

In base alle considerazioni effettuate, 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.