



COMUNE DI ALTOPASCIO  
PROVINCIA DI LUCCA  
REGIONE TOSCANA

## IMPIANTO AGRIVOLTAICO "RNE13"

Proponente

**RNE13 S.R.L.**

Viale San michele del Carso, 22  
20144 Milano (MI)  
C.F. 12728030961

Progettazione

**SOCIETA' DI PROGETTAZIONE  
GSB CONSULTING SRL**

Via Passo Rolle, 9 – 20134 Milano (MI)  
P.IVA 11882750968



Preparato  
**Irina Giorgi**

Verificato  
**Gianandrea Ing. Bertinazzo**

Approvato  
**Vasco Ing. Piccoli**

## PROGETTAZIONE DEFINITIVA

Titolo elaborato

### RNE13 RELAZIONE TECNICA OPERE ELETTRICHE

Elaborato N.

**R06**

Data emissione  
12/12/24

Nome file  
RELAZIONE TECNICA OPERE ELETTRICHE

N. Progetto  
**RNE13**

Pagina  
COVER

|      |          |                 |
|------|----------|-----------------|
| 00   | 24/04/24 | PRIMA EMISSIONE |
| REV. | DATA     | DESCRIZIONE     |

IL PRESENTE DOCUMENTO NON POTRA' ESSERE COPIATO, RIPRODOTTO O ALTRIMENTI PUBBLICATO, IN TUTTO O IN PARTE, SENZA IL CONSENSO SCRITTO DI RNE13 S.R.L... OGNI UTILIZZO NON AUTORIZZATO SARA' PERSEGUITO A NORMA DI LEGGE.  
THIS DOCUMENT CAN NOT BE COPIED, REPRODUCED OR PUBLISHED, EITHER IN PART OR IN ITS ENTIRETY, WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF RNE13 S.R.L. UNAUTHORIZED USE WILL BE PROSECUTED BY LAW.

## Sommario

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Premessa .....   | 3  |
| 2     | Descrizione generale .....   | 3  |
| 2.1   | Dati generali di progetto .....                                    | 3  |
| 2.2   | Configurazione campo FV .....                                      | 4  |
| 2.2.1 | Configurazione lato Corrente Continua .....                        | 6  |
| 2.2.2 | Configurazione Lato Corrente Alternata .....                       | 6  |
| 3     | Verifiche di Coordinamento .....                                   | 7  |
| 3.1   | Coordinamento Elettrico Lato CC .....                              | 7  |
| 3.2   | Coordinamento Elettrico Lato CA .....                              | 10 |
| 4     | Collegamenti elettrici .....                                       | 12 |
| 4.1   | Cavi in corrente continua (BT) .....                               | 13 |
| 4.1.1 | Cavi di Stringa – Configurazione e modalità di Installazione ..... | 14 |
| 4.1.2 | Cavi SB – Configurazione e modalità di Installazione .....         | 19 |
| 4.2   | Cavi in corrente alternata (MT) .....                              | 24 |
| 4.2.1 | Elettrodotto Utente MT interno all'impianto .....                  | 25 |
| 4.2.2 | Elettrodotto Utente MT esterno all'impianto .....                  | 27 |
| 4.3   | Altri cavi .....   | 34 |
| 4.3.1 | Cavi nella Cabina di Trasformazione MT/BT .....                    | 34 |
| 4.3.2 | Cavi Alimentazione Trackers .....                                  | 34 |
| 4.3.3 | Cavi di sicurezza e sorveglianza .....                             | 34 |
| 4.3.4 | Cavi Dati .....  | 34 |
| 5     | Protezioni elettriche .....  | 35 |

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

## 1 Premessa

La presente relazione ha lo scopo verificare tecnicamente il dimensionamento e l'idoneità dei principali componenti dell'impianto di generazione di energia elettrica da fonte fotovoltaica denominato "RNE13", da ubicarsi nel Comune di Altopascio (LU), di potenza nominale complessiva pari a 19'972,68 kWp, per una potenza in immissione in rete complessiva pari a 17'250,00 Kw.

## 2 Descrizione generale

### 2.1 Dati generali di progetto

In Tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche tecniche relative all'impianto in progetto.

Tabella 1 - Principali caratteristiche dell'impianto agri-FV denominato "RNE13"

|  |  |
|--|--|
| <b>Società Proponente</b>  | RNE13 S.r.l.   |
| <b>Luogo di realizzazione</b><br><b>(impianto FV + elettrodotto)</b> | Altopascio (LU)<br>Altopascio (LU) e Porcari (LU)  |
| <b>Denominazione impianto</b>  | RNE 13   |
| <b>Superficie di interesse catastale</b>                             | 36,2 Ha  |
| <b>Superficie di interesse recintata</b>                             | 23,8 Ha  |
| <b>Potenza di picco</b>  | 19'972,68 kWp  |
| <b>Potenza apparente (*)</b>   | 17'250,00 kVA  |
| <b>Potenza in STMG</b>   | 17'250,00 kW   |
| <b>Modalità connessione alla rete</b>                                | Realizzazione di tre cabine di consegna che saranno collegate in antenna alla Cabina Primaria di Porcari |
| <b>Tensione di esercizio:</b>  |  |
| <b>Bassa tensione CC</b>   | <1500 V  |
| <b>Bassa tensione CA</b>   | 600 V/655 V sezione generatore (inverter)<br>400/230 sezione ausiliari                                   |
| <b>Media Tensione</b>  | 15 kV  |
| <b>Strutture di sostegno</b>   | Tracker mono-assiali configurazione 2P   |
| <b>Inclinazione piano dei moduli (tilt)</b>                          | Tracker: 0° (rotazione Est/Ovest ±55°)   |
| <b>Angolo di azimuth</b>   | 16°-20°  |
| <b>N° moduli FV</b>  | 32'214   |
| <b>N° inverter</b>   | 6  |
| <b>N° cabine di trasformazione BT/MT</b>                             | 6  |

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

## 2.2 Configurazione campo FV

Nella particella 88 Fg. 8 del comune di Porcari saranno ubicate tre cabine di consegna in MT, dotate di opportune protezioni elettriche, alle quali saranno collegate le cabine di trasformazione in configurazione radiale, in gruppi di massimo 6 MVA per ciascuna linea.

All'interno dei confini dell'impianto FV è prevista l'installazione di sei cabine di trasformazione (due per ogni lotto di impianto) realizzate tramite soluzione containerizzata, contenenti fondamentalmente l'inverter centralizzato, il trasformatore MT/BT e i quadri elettrici MT e BT.

Per l'impianto FV in oggetto si prevede l'utilizzo di inverter centralizzati, posizionati direttamente in campo, a ciascuno dei quali saranno collegate fino ad un massimo di 13 cassette di stringa (o "string box"). A sua volta, ogni cassetta di stringa può ricevere in input un massimo di 17 stringhe di moduli fotovoltaici.

I moduli fotovoltaici, realizzati con tecnologia bifacciale ed in silicio mono-cristallino ad elevata efficienza, saranno collegati elettricamente in serie a formare stringhe da 28 moduli, e posizionati su strutture ad inseguimento solare mono-assiale, in configurazione a doppia fila con modulo disposto verticalmente (configurazione 2-P).

L'utilizzo di tracker consente la rotazione dei moduli FV attorno ad un unico asse orizzontale avente orientazione Nord-Sud, al fine di massimizzare la radiazione solare captata dai moduli stessi e conseguentemente la produzione energetica del generatore FV.

Per l'impianto FV in oggetto si prevede l'utilizzo di inverter centralizzati, posizionati direttamente in campo, a ciascuno dei quali saranno collegate fino ad un massimo di 13 cassette di stringa (o "string box"). A sua volta, ogni cassetta di stringa può ricevere in input un massimo di 17 stringhe di moduli fotovoltaici.

All'interno dei confini dell'impianto FV è prevista l'installazione di sei cabine di trasformazione (due per ogni lotto di impianto) realizzate tramite soluzione containerizzata, contenenti fondamentalmente l'inverter centralizzato, il trasformatore MT/BT e i quadri elettrici MT e BT.

L'energia generata dall'impianto agrovoltaiico, composto da tre impianti di generazione distinti dal punto di vista elettrico (configurazione "lotto d'impianti" connessi in media tensione), viene raccolta tramite una rete di elettrodotti interrati in Media Tensione eserciti a 15 kV che confluiscono presso le tre cabine di consegna situate nel comune di Porcari al Foglio 8 p.lla 88, in posizione accessibile dalla viabilità pubblica, presso le quali è ubicato il punto di consegna dell'energia generata alla rete di distribuzione.

Tre elettrodotti interrati in Media Tensione a 15 kV trasporteranno quindi l'energia generata presso la cabina primaria nel comune di Porcari (LU).

La potenza nominale complessiva dell'impianto, determinata dalla somma delle potenze nominali dei moduli fotovoltaici, è pari a 19'972,66 kWp, mentre la potenza in immissione in rete è pari a 17'250,00 kW.

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |



Figura 1: Inquadramento su Ortofoto

In Tabella 1Tabella 2 è riportata la consistenza dell’impianto, in termini di numerosità dei principali componenti installati.

Tabella 2 - Numerosità dei principali componenti d’impianto

| CABINA  | STRUTTURE 2x26 | STRUTTURE 2x13 | TOTALE STRINGHE | PANNELLI | NUMERO STRING BOX | NUMERO STRINGHE PER STRING BOX | POTENZA DC kWp | POTENZA AC kVA | RAPPORTO DC/AC |
|---------|----------------|----------------|-----------------|----------|-------------------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| C1.1    | 104            | 11             | 219             | 5.694    | 13                | 17                             | 3.530,28       | 3.000          | 1,18           |
| C1.2    | 90             | 14             | 194             | 5.044    | 12                | 16                             | 3.127,28       | 2.750          | 1,14           |
| LOTTO 1 | 194            | 25             | 413             | 10.738   | 25                |                                | 6.657,56       | 5.750          | 1,16           |
| C2.1    | 101            | 11             | 213             | 5.538    | 13                | 16                             | 3.433,56       | 3.000          | 1,14           |
| C2.2    | 96             | 8              | 200             | 5.200    | 12                | 17                             | 3.224,00       | 2.750          | 1,17           |
| LOTTO 2 | 197            | 19             | 413             | 10.738   | 25                |                                | 6.657,56       | 5.750          | 1,16           |
| C3.1    | 89             | 9              | 187             | 4.862    | 12                | 16                             | 3.014,44       | 2.750          | 1,10           |
| C3.2    | 107            | 12             | 226             | 5.876    | 13                | 17                             | 3.643,12       | 3.000          | 1,21           |
| LOTTO 3 | 196            | 21             | 413             | 10.738   | 25                |                                | 6.657,56       | 5.750          | 1,16           |
| TOTALE  | 587            | 65             | 1.239           | 32.214   | 75                |                                | 19.972,68      | 17.250         | 1,16           |

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
|           |          |                 |
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

### 2.2.1 Configurazione lato Corrente Continua

La configurazione lato corrente continua dell'impianto prevedere essenzialmente:

- una potenza DC pari a 19'972,66 kWp, dati da:
  - o Nr. 32'214 Moduli Fotovoltaici;
  - o collegati in nr. 1'239 stringhe;
  - o che confluiscono in nr. 6 Inverter centralizzati
  - o raggruppati a loro volta in nr.6 cabine di trasformazione.
- una potenza AC pari a 17'250,00 kVA.

### 2.2.2 Configurazione Lato Corrente Alternata

La configurazione Lato Corrente Alternata dell'impianto FV prevede essenzialmente:

- nr. 6 inverter centralizzati che ricevono una potenza una potenza DC pari a 19'972,66 kWp (@STC) e la convertono in AC una potenza pari a 17'250,0 kVA;
- nr. 6 trasformatori MT/BT per una potenza complessiva nominale pari a 17'250,0 kVA.

Per la descrizione dettagliata dei componenti d'impianto si rimanda alle relazioni tecniche di impianto FV.

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

### 3 Verifiche di Coordinamento

#### 3.1 Coordinamento Elettrico Lato CC

L'elemento di partenza per il coordinamento lato corrente continua è il modulo fotovoltaico, i cui dati elettrici riportati alle condizioni STC sono:

$$P = 620\text{Wp, con } -0,28\%/^{\circ}\text{C}$$

$$V_{OC} = 52,466\text{V, con } -0,25\%/^{\circ}\text{C} - V_{MPP} = 44,55\text{V}$$

$$I_{SC} = 14,81\text{A, con } +0,046\%/^{\circ}\text{C} - I_{MPP} = 13,92\text{A}$$

Si procede quindi con il calcolo dei parametri elettrici del modulo FV in funzione delle condizioni ambientali del presente progetto; l'intervallo di funzionamento è tra le temperature ambiente di  $-5^{\circ}\text{C}$  e  $50^{\circ}\text{C}$ , che corrisponde indicativamente ad una temperatura di funzionamento delle celle FV tra  $+0^{\circ}\text{C}$  e  $70^{\circ}\text{C}$ . La temperatura ambiente minima di  $-5^{\circ}\text{C}$  risulta relativa ad ore notturne, mentre per far sì che un modulo fotovoltaico raggiunga un valore di tensione prossimo a quello di  $V_{OC}$  riportato nella scheda tecnica fornita dal costruttore (relativo a condizioni STC, ovvero irraggiamento pari a  $1000\text{ W/m}^2$ ) si ritiene necessario un valore di irraggiamento pari o superiore a  $100\text{ W/m}^2$ . In conclusione, si ritiene sufficientemente cautelativa l'ipotesi di considerare una temperatura minima di funzionamento di cella FV pari a  $0^{\circ}\text{C}$ , e quindi i parametri elettrici sono:

$$V_{OC} = 55,95\text{V @ } 0^{\circ}\text{C} - V_{MPP} @ 0^{\circ}\text{C} = 47,33\text{V} - V_{MPP} @ 70^{\circ}\text{C} = 39,54\text{V}$$

$$I_{SC} = 15,12\text{A @ } 70^{\circ}\text{C} - I_{MPP} = 14,21\text{A}$$

Si prevede di realizzare stringhe costituite da 26 moduli FV collegati tra di loro elettricamente in serie. Ciascuna stringa elettricamente si caratterizza come segue:

$$V_{OC} = 55,95 \times 26 = 1'454,73\text{V} - V_{MPP} = 47,33 \times 26 = 1'230,69\text{V}$$

$$I_{SC} = 15,12\text{A @ } 70^{\circ}\text{C} - I_{MPP} = 14,21\text{A}$$

---

#### A) Verifica di coordinamento → tensione di isolamento CC

$$V_{IS\ DC} \geq 1'454,73\text{ V}$$

Moduli FV presentano tensione di isolamento pari a  $1'500\text{V}$ .

Si rimanda ai paragrafi successivi della presente relazione per la verifica della tensione di isolamento dei cavi DC.

---

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

**B) Verifica di coordinamento → corrente di stringa CC**

$$I_{SC} = 15,12A @70^{\circ}C - I_{MPP} = 14,21A$$

Si rimanda al paragrafo dedicato per la verifica della portata di corrente del cavo DC di stringa

Lo SB (cassetta di parallelo-stringa) è il quadro di primo parallelo DC, installato direttamente in campo, che collegherà in parallelo più stringhe; lo SB selezionato prevede un massimo di 20 stringhe, ma, come è stato possibile verificare dalla configurazione riportata in introduzione al paragrafo 2.2, non saranno collegate più di 17 stringhe.

Per cui si ha:

$$V_{OC} = 55,95 \times 26 = 1'454,73V - V_{MPP} = 47,33 \times 26 = 1'230,69V$$

$$I_{SB} = 15,12 \times 17 = 256,98A - I_{MPP} = 14,21 \times 17 = 241,54A$$

**C) Verifica di coordinamento → lo string box (SB): tensione, corrente ingresso e corrente uscita**

$$V_{IS} = 1'500V \geq 1'454,73V$$

$$I_{FUS} = 30A - \text{tipo gPV, } 1'500V \rightarrow > 15,12/0,8 = 18,9A \text{ OK } \checkmark$$

$$I_{GEN} = 400A \text{ (limitati a } 350A \text{ a causa } t_{amb \text{ MAX}} @ 50^{\circ}C) \rightarrow > 256,98A \text{ OK } \checkmark$$

**D) Verifica di coordinamento → corrente di stringa SB**

$$I_{SB} = 256,98A$$

Si rimanda ai paragrafi successivi della presente relazione per la verifica della portata di corrente del cavo DC di stringa.

L'inverter è il componente che permette la conversione da corrente continua a corrente alternata; si considera la configurazione più gravosa elettricamente per verificarne il coordinamento, ovvero:

| CABINA | STRUTTURE 2x26 | STRUTTURE 2x13 | TOTALE STRINGHE | PANNELLI | NUMERO STRING BOX | NUMERO STRINGHE PER STRING BOX | POTENZA DC kWp | POTENZA AC kVA | RAPPORTO DC/AC |
|--------|----------------|----------------|-----------------|----------|-------------------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| C3.2   | 107            | 12             | 226             | 5.876    | 13                | 17                             | 3.643,12       | 3.000          | 1,21           |

Quindi le grandezze elettriche da verificare sono:

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |



$$V_{OC} = 55,95 \times 26 = 1'454,73V - V_{MPP} = 47,33 \times 26 = 1'230,69V$$

$$\text{Ingresso SB} \rightarrow I_{MAX} = 15,12 \times 17 = 256,98A$$

$$\text{Inverter} \rightarrow P_{CC} = 3'643,12kWp - I_{MAX} = 256,98 \times 13 = 3'340,76 A - I_{MPP} = 241,54 \times 13 = 3'140A$$

E) Verifica di coordinamento → l'inverter: tensione isolamento e range MPP, corrente ingresso per canale e totale

$$V_{IS} = 1'500V \geq 1'454,73V - V_{MPP} = 1'230,69V \text{ incluso nel Range MPP a } 25^{\circ}C (875V/956V...1'425V)$$

$$I_{FUSE IN} = 400A > 256,98/0,8 = 321,23A$$

$$\text{Inverter} \rightarrow I_{SC MAX} = 3'600A > 3'340,76 A \text{ OK } \checkmark$$

$$I_{MPP MAX} = 3'200A > 3'140,00 A \text{ OK } \checkmark$$

F) Verifica di coordinamento → tensione di isolamento BT

$$V_{SB} = 1454,73V$$

Inverter e cavi di collegamento BT sono tutti con tensione di isolamento pari a 1500V.

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

### 3.2 Coordinamento Elettrico Lato CA

L'elemento di partenza per il coordinamento lato CA è l'inverter, le cui grandezze elettriche lato CA sono di seguito riassunte:

$$V_N = 600V/655V \pm 10\% - 50/60Hz$$

Inverter → Potenza Uscita @25°C = 2'750 kVA/3'000 kVA, @50°C = 2'500 kVA/2'700 kVA

$$I_{MAX} = 2624A - \text{intervallo } \cos \phi = 0,8_{CAP} \dots 0,8_{IND}$$

#### A) Verifica di coordinamento → Trasformatore MT/BT

Tensione Uscita Inverter 600V/655V – Rapporto di trasformazione MT/BT 20'000/600 [V] - 20'000/655 [V] **OK** ✓

Inverter → Potenza inverter 2'750kVA/3'000 kVA

max 1 inverter per trasformatore → 2'750 kVA/3'000 kVA @25°C

Potenza trasformatore MT/BT: 2'750 kVA/3'000kVA@25° (1 inverter) **OK** ✓

#### B) Verifica di coordinamento → tensione di isolamento BT

$$V_{IS BT} \geq 600V/655V$$

Gli inverter d'impianto sono tutti con tensione di isolamento pari a 1'000V.

Si rimanda ai paragrafi successivi della presente relazione per la verifica della tensione di isolamento dei cavi CA.

#### C) Verifica di coordinamento → Quadro MT di cabina di trasformazione

Caratteristiche e classificazione: 24kV-16kA-630A - LSC2A/PI IAC AFLR 16kA x 1s

Tensione Uscita Trasformatore 15'000V - Tensione isolamento quadro MT di Cabina 24'000V **OK** ✓

Corrente massima linee radiale 221,6A – Corrente nominale quadro MT di cabina 630A **OK** ✓

#### D) Verifica di coordinamento → corrente di linea MT

$$I_{CAB} = 221,6A$$

Si rimanda ai paragrafi successivi della presente relazione per la verifica della portata di corrente del cavo MT nelle varie tratte.

#### E) Verifica impianto → Rapporto potenza DC / potenza AC

Potenza DC = a 19'972,68 kWp – Potenza massima generabile dagli inverter = 17'250,00 kVA

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

Rapporto potenze DC/AC = 1,16 **OK** 

Tenuto conto:

- della potenza effettivamente resa disponibile nel punto di generazione per effetto degli scostamenti dalle STC (25°C temperatura di cella FV, 1000W/m<sup>2</sup>),
- delle perdite dal punto di generazione (morsetti moduli FV) al PdC,

si ritiene che il rapporto DC/AC sia corretto.

---

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

## 4 Collegamenti elettrici

I collegamenti elettrici da realizzarsi all'interno dell'impianto agrovoltico consistono fondamentalmente in:

- Cavi in CC - Cavi di stringa: ovvero i cavi CC che collegano la stringa al quadro di parallelo stringa (di seguito SB);
- Cavi in CC - Cavi di SB: ovvero i cavi CC che collegano gli SB all'inverter;
- Cavi in CA/BT - Cavi inverter: ovvero i cavi in CA che collegano gli inverter al trasformatore;
- Cavi in CA/MT: ovvero i cavi MT utilizzati nelle linee radiali interne al campo agrovoltico verso le cabine di consegna e l'elettrodotto MT di connessione verso la cabina primaria;
- Altri cavi: quali ad esempio i cavi di alimentazione dei tracker, cavi dei sistemi di sicurezza, etc.

Il dimensionamento dei cavi eserciti in BT ed in MT, utilizzati per il trasporto di energia dai moduli FV agli inverter centralizzati, quindi alle cabine di trasformazione fino al punto di consegna, è stato effettuato tenendo conto dei seguenti criteri di verifica:

- verifica della portata di corrente e coordinamento protezioni;
- verifica della caduta di tensione;
- verifica della tenuta al corto circuito;
- verifica delle perdite.

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

#### 4.1 Cavi in corrente continua (BT)

I cavi in corrente continua sono necessari per raggruppare i moduli fotovoltaici e rendere disponibile questa energia in ingresso lato CC dell'inverter.

I moduli fotovoltaici di per sé stessi sono forniti già dotati di cavi e relativo connettore CC (uno per il polo negativo, uno per il polo positivo), ma di lunghezza tale da permettere il solo collegamento tra moduli fotovoltaici contigui. Verranno quindi collegati in serie tra di loro fino a comporre una stringa, che in questo progetto è composta dalla serie di 26 moduli FV produttore Longi, modello LR7-72HGD-620M, e presentano una potenza nominale a STC<sup>1</sup> pari a 620 Wp.

Il cavo di collegamento di questa stringa è chiamato cavo di stringa e per questo progetto è stato selezionato un cavo del tipo H1Z2Z2.

Dato che l'inverter è di tipologia centralizzato, ed in particolare del costruttore SMA SUNNY CENTRAL 2750-EV e SUNNY CENTRAL 3000-EV, le stringhe che devono arrivare al suddetto inverter sono in numero considerevole; risulta quindi evidente la necessità di prevedere direttamente in campo a dei quadri di primo parallelo DC, detti string box (SB di seguito), che in ingresso avranno un certo numero di stringhe (in questo progetto fino a 17 stringhe per SB), che collegheranno in parallelo, rendendo disponibile in uscita una potenza maggiore.

I cavi di collegamento degli SB sono chiamati cavi di SB e per questo progetto è stato scelto il cavo tipo ARG16R16.

La sezione CC verrà esercita con un Sistema Isolato. In accordo con il Sistema Normativo Internazionale, il funzionamento in Sistema Isolato:

- prevede entrambi i poli (Negativo e Positivo) NON connessi a terra in nessun punto ed in nessun caso;
- prevede un controllore di isolamento, che garantisca il continuo monitoraggio del valore di resistenza tra i poli e terra; il cedimento dell'isolamento dovrà essere chiaramente rilevato in modo da permettere al gestore dell'impianto di effettuare i necessari interventi di manutenzione straordinaria alla ricerca del guasto;
- permette il funzionamento del sistema con il primo guasto a terra, a patto che il primo guasto sia chiaramente rilevato e che il secondo guasto determini l'intervento degli organi di protezione atti al sezionamento della parte di circuito sottoposta al doppio guasto.

<sup>1</sup> STC - Standard Test Conditions: irraggiamento solare 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura modulo FV 25°C, Air Mass 1,5

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

#### 4.1.1 Cavi di Stringa – Configurazione e modalità di Installazione

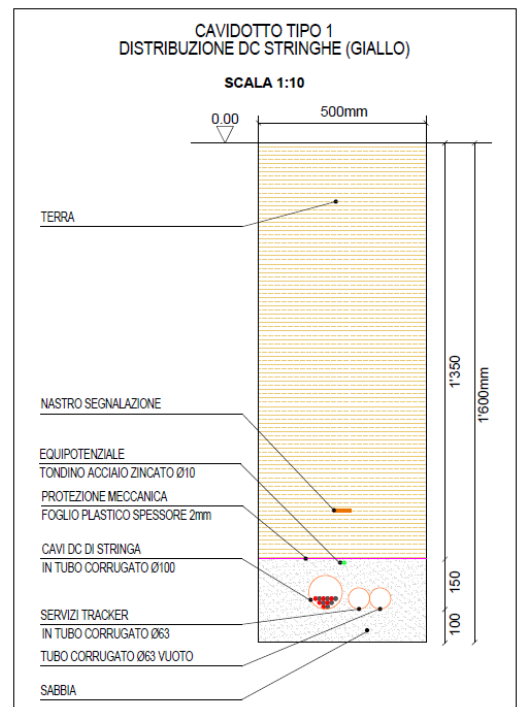
I cavi avranno tratti sia all'aperto (tipicamente lungo la struttura fotovoltaica di sostegno dei moduli fotovoltaici), sia sottoterra per il raggiungimento dell'inverter.

Dato che il cavo avrà tratti in cui verrà esposto all'irraggiamento diretto è necessario che il cavo sia adatto a questo tipo di funzionamento. Come già specificato nel paragrafo precedente è scelto il cavo in Rame, tipo H1Z2Z2, con la seguente configurazione:

$$2// (1 \times 6) \text{ mm}^2$$

Di seguito si riportano le principali caratteristiche tecniche del cavo selezionato e un estratto delle sezioni tipo dei cavidotti:

|  |  |
|--|--|
| <b>Modello</b>                             | H1Z2Z2   |
| <b>Conduttore</b>                          | Rame stagnato, flessibile                              |
| <b>Isolante</b>                            | HEPR tipo G21  |
| <b>Guaina</b>                              | Mescola elastomerica reticolata senza alogeni tipo M21 |
| <b>Temperatura di esercizio</b>            | -40°C ÷ +120°C   |
|  |  |
| <b>Tensione massima AC [V]</b>             | 1200   |
| <b>Tensione massima DC [V]</b>             | 1800   |
|  |  |
| <b>Sezione conduttore [mm<sup>2</sup>]</b> | 6  |
| <b>Portata corrente in aria [A]</b>        | 70 (@60°C)   |



La sezione tipica di questi cavidotti è essenzialmente costituita da una sezione larga 500mm e profonda 1'600mm, che sarà riempita con:

- Sabbia di fiume nella parte più profonda per evitare che i cavi direttamente interrati possano essere a contatto diretto con sassi e/o detriti che ne possano scongiurare l'integrità durante tutti gli anni di esercizio, con:
  - uno spessore pari a circa 100mm sul fondo;
  - uno spessore pari a circa 150mm nel quale verranno installati cavi e corrugati in base alla specificità di ogni tratta;
- Un foglio plastico per la separazione tra strato inferiore e strato superiore, avente anche la funzione di protezione meccanica;
- Terra di riporto per il riempimento dello strato superiore, fino al livellamento nativo della sezione.

Si rimanda all'elaborato grafico "Layout Dettagliato Cavidotti BT e CC" per indicazioni su dove sono posati i cavi.

|                  |             |                    |
|------------------|-------------|--------------------|
| 00               | 12/12/24    | Prima Emissione    |
| <b>Revisione</b> | <b>Data</b> | <b>Descrizione</b> |

#### 4.1.1.1 Condizioni di esercizio

In questo paragrafo vengono identificate le condizioni di esercizio elettriche e ambientali, necessarie per procedere con la verifica del dimensionamento.

##### 4.1.1.1.1 Tensione di esercizio

In merito alla tensione, il lato continuo di un Impianto di Generazione Agrovoltaiico ha un valore di tensione di esercizio variabile, a seconda dell'irraggiamento e della regolazione dell'inverter, che impone la tensione di esercizio in ricerca del punto di massima resa (MPP) o, in rarissimi casi, impone una tensione di esercizio che mantenga in uscita (lato CA) un valore imposto di potenza.

Per conoscere i valori di riferimento di tensione bisogna quindi fare riferimento al dimensionamento campo FV; il valore di riferimento della tensione è pari al massimo valore di tensione di sistema, ovvero:

$$V_e = 1'500V$$

##### 4.1.1.1.2 Corrente di esercizio

In merito alla corrente, analogamente a quanto descritto nel paragrafo precedente, bisogna fare riferimento al dimensionamento campo FV; la corrente varia all'interno di un intervallo 0...15,12 A; in accordo con le Norme di riferimento, la corrente di dimensionamento è pari alla corrente di corto circuito con temperatura di cella pari a 70°C, per cui il valore di riferimento della corrente è pari a:

$$I_N = 15,12A$$

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

#### 4.1.1.1.3 Verifica Portata di Corrente e Coordinamento Protezioni

Per valutare la portata in corrente devono essere determinati su ogni tratta i coefficienti di declassamento della portata in funzione delle condizioni di installazione.

I coefficienti di declassamento sono in funzione della modalità di posa, che per i cavi in Corrente Continua sono:

- in aria, nei tratti lungo la struttura fotovoltaica di sostegno dei moduli fotovoltaici, con più circuiti;
- all'interno di tubo corrugato nei tratti sotterranei per il collegamento tra diverse file strutture fotovoltaiche, con più circuiti.

I coefficienti sono rispettivamente:

| Cavi in aria  | Cavi in Tubo Corrugato interrato  |
|---|---|
| Temperatura $\rightarrow k_1 = 1$   | Temperatura $\rightarrow k_1 = 1$   |
| Tipo di posa: stesso piano, circuiti a contatto<br>$\rightarrow k_2 = 0,80$       | Tipo di posa: più circuiti per tubo<br>$\rightarrow k_2 = 0,6$  |
|   | profondità = 1.6 m $\rightarrow k_3 = 0,94$   |
|   | resistività terreno = 1,5 °K x m/W $\rightarrow k_4 = 1$  |
| fattore di sicurezza $\rightarrow k_5 = 0,95$                                     | fattore di sicurezza $\rightarrow k_5 = 0,95$   |
| <b>TOTALE <math>\rightarrow k_{TOT} = k_1 \times k_2 \times k_5 = 0,76</math></b> | <b>TOTALE <math>\rightarrow k_{TOT} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 = 0,50</math></b> |

(\*) = il valore di portata del cavo solare è già dichiarato a 60°C, per cui in via cautelativa si considera un fattore di temperatura unitario.

È evidente che la condizione peggiorativa sia il tratto in cui i cavi sono posizionati all'interno del tubo corrugato: la verifica della portata di corrente deve essere fatta considerando questa condizione peggiorativa. Verrà quindi considerato il fattore  **$k_{TOT} = 0,50$** .

**La verifica ha esito positivo se viene soddisfatta la condizione:**

$$I_N < I_Z$$

dove:

- $I_N$  è la corrente nominale della linea da proteggere;
- $I_Z$  è la portata del cavo.

Facendo riferimento alla configurazione cavi riportata in relazione tecnica impianto e nello schema unifilare, e al valore di portata lorda dei cavi (portata in aria libera), riportato nel data sheet in appendice, di seguito la tabella riassuntiva di verifica portata di corrente.

(unità di misura:  $I_N$ ,  $I_Z$  e la portata lorda sono espresse in A, la configurazione cavi è espressa in mm<sup>2</sup>)

| $I_N$ | Configurazione Cavo | Potata lorda | $k_{tot}$ | $I_Z$ | Verifica |
|-------|---------------------|--------------|-----------|-------|----------|
| 15,12 | 2//(1x6)            | 70           | 0,50      | 35,0  | OK       |

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |



#### 4.1.1.1.4 Coordinamento Protezioni

Ogni cavo di corrente continua sarà protetto direttamente da una coppia di fusibili direttamente installati all'interno del SB, uno collegato in serie al polo positivo, uno in serie al polo negativo. I fusibili selezionati sono di taglia uguale per ogni stringa:

$$I_{FUS} = 30A - \text{tipo gPV, 1'500V}$$

Il fusibile è un organo di protezione termico, il cui valore di intervento (e conseguente apertura del circuito) dipende dal fattore di declassamento per temperatura ambiente. Dato che il fusibile è all'interno del quadro SB, installato all'estero e con grado di protezione pari a IP65, si calcola la corrente reale di intervento del fusibile pari a

$$I_{PROT} = 30A \times 0,8 = 24A$$

**La verifica del coordinamento ha esito positivo se è rispettata la seguente condizione:**

$$I_N < I_r < I_z$$

dove:

- $I_N$  è la corrente nominale di stringa, pari a 15,12A;
- $I_r$  è la corrente di protezione, appena calcolata, pari a 24A;
- $I_z$  è la corrente del cavo selezionato, calcolata nel precedente paragrafo, pari a 35.

Nel presente caso si ha:

$$15,12 < 24 < 35$$

**La portata di corrente e la verifica coordinamento di protezioni di tutte le linee è verificata. OK** 

#### 4.1.1.1.5 Verifica Caduta di Tensione

Per valutare la caduta di tensione sarà applicata la seguente formula:

$$\Delta v\% = \frac{n \times I_e \times L \times r}{V_e}$$

dove:

- $n$  una costante che dipende dal sistema di distribuzione, che nel caso di corrente continua è pari a 2;
- $I_e$  è la corrente della singola stringa, che non può essere la corrente di dimensionamento, ma quella di funzionamento a massima potenza, pari a 14,21A;
- $L$  è la lunghezza del tratto di stringa, si considera la stringa che ha il tratto più lungo, con  $L$  pari a circa 200m;
- $r$  è la resistenza specifica del conduttore, in accordo con data sheet pari a 3,39  $\Omega$ /km;
- $V_e$  è la tensione di esercizio della stringa, che come spiegato è variabile durante l'esercizio; si considera il valore di MPP, quindi pari a  $V_{MPP} = 1'230,69V$ .

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

Si può quindi applicare la formula del calcolo della caduta di tensione:

$$\Delta v\%_{\text{media}} = \frac{2 \times 14,21 \times 0,200 \times 3,39}{1'230,69} = 1,57\%$$

Il valore di caduta di tensione per ogni sezione è limitato dalle Norme ed il valore limite è pari al 3%, per cui:

$$\Delta v\%_{\text{MAX}} = 1,57\% < 3\%$$

**Il dimensionamento del cavo CC rispetta le condizioni di massima caduta di tensione della tratta. OK** 

#### 4.1.1.1.6 Verifica Tenuta al corto circuito

Per valutare la tenuta al corto circuito (energia passante) sarà applicata la seguente formula:

$$S_{\text{min}} = \frac{I_{\text{CC}} \times \sqrt{t}}{k_C}$$

Il funzionamento della sezione in corrente continua dell'impianto agrovoltico prevede una corrente di corto circuito pari a 15,12A e quindi la verifica della tenuta al corto circuito altro non è che la verifica della portata del cavo, già verificata nei paragrafi precedenti.

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

#### 4.1.2 Cavi SB – Configurazione e modalità di Installazione

I cavi saranno installati all'interno di tubo corrugato.

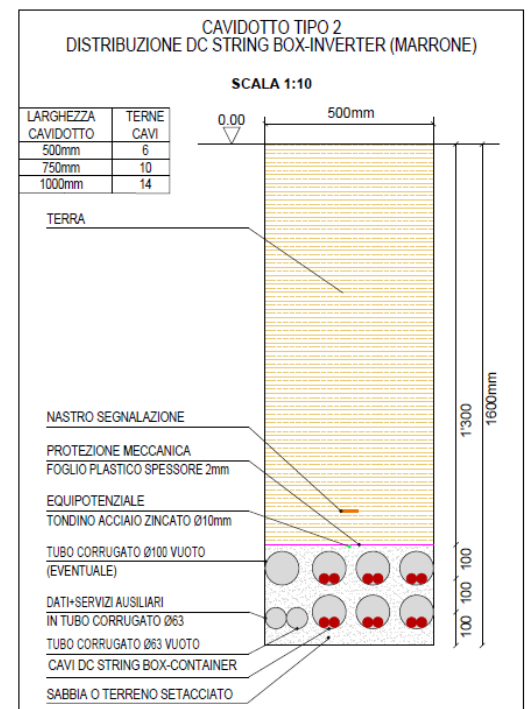
Come già specificato nel paragrafo precedente è scelto il cavo in Alluminio, tipo ARG16R16; la configurazione prevista in questa fase di progettazione definitiva è la seguente:

$$2// (1 \times 500) \text{ mm}^2$$

In fase di progettazione esecutiva/costruttiva, potranno essere ottimizzate le configurazioni cavi, prevedendo cavi con sezione inferiore in funzione della distanza del collegamento.

Di seguito si riportano le principali caratteristiche tecniche del cavo selezionato:

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| <b>Modello</b>                  | ARG16R16   |
| <b>Conduttore</b>               | Corda compatta a fili di alluminio (CEI 20-29, classe 2) |
| <b>Isolante</b>                 | HEPR   |
| <b>Guaina</b>                   | Mescola termoplastica tipo R16                           |
| <b>Temperatura di esercizio</b> | 0 – 90°C   |
|                                 |  |
| <b>Tensione massima AC</b>      | 1200 V   |
| <b>Tensione massima DC</b>      | 1800 V   |
|                                 |  |
| <b>Sezione conduttore</b>       | 500 mm <sup>2</sup>                                      |
| <b>Portata corrente</b>         | Interrato in tubo: 505 A                                 |
|                                 | In aria: 765 A   |
|                                 | Direttamente interrato: 578 A                            |



La sezione tipica di questi cavidotti è essenzialmente costituita da una sezione larga da 500 a 1'000mm (a seconda del numero di cavi DC da posizionare) e profonda 1'600mm, che sarà riempita con:

- Sabbia di fiume nella parte più profonda per evitare che i cavi direttamente interrati possano essere a contatto diretto con sassi e/o detriti che ne possano scongiurare l'integrità durante tutti gli anni di esercizio, con:
  - uno spessore pari a circa 100mm sul fondo;
  - uno spessore pari a circa 200mm nel quale verranno installati cavi SB e corrugati in base alla specificità di ogni tratta;
- Un foglio plastico per la separazione tra strato inferiore e strato superiore, avente anche la funzione di protezione meccanica;

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

- Terra di riporto per il riempimento.

Si rimanda all'elaborato grafico "Layout Dettagliato Cavidotti BT e CC" per indicazioni su dove sono posati i cavi.

#### 4.1.2.1 Condizioni di esercizio

In questo paragrafo vengono identificate le condizioni di esercizio elettriche e ambientali, necessarie per procedere con la verifica del dimensionamento.

##### 4.1.2.1.1 Tensione di esercizio

Il lato continua di un Impianto di Generazione Agrovoltaiico ha un valore di tensione di esercizio variabile, a seconda dell'irraggiamento e della regolazione dell'inverter, che impone la tensione di esercizio in ricerca del punto di massima resa (MPP) o, in rarissimi casi, impone una tensione di esercizio che mantenga in uscita (lato CA) un valore imposto di potenza.

Il valore di riferimento della tensione è:

$$V_e = 1'500 \text{ V}$$

##### 4.1.2.1.2 Corrente di esercizio

In merito alla corrente di esercizio, analogamente a quanto fatto per la corrente di stringa, in accordo con le Norme di riferimento, la corrente di dimensionamento è pari alla corrente di corto circuito a 70°C temperatura di cella (15,12A) moltiplicata per il numero di stringhe collegate al dato SB, al massimo pari a 17, avremo:

$$I_N = 17 \times 15,12 = 256,98 \text{ A}$$

##### 4.1.2.1.3 Verifica Portata di Corrente e Coordinamento Protezioni

Per valutare la portata in corrente devono essere determinati su ogni tratta i coefficienti di declassamento della portata in funzione delle condizioni di installazione.

I coefficienti di declassamento sono in funzione della modalità di posa, che per i cavi in Corrente Continua SB sono:

- direttamente interrati lungo tutto il percorso, in formazione in piano;
- all'interno di tubo corrugato.

I coefficienti sono rispettivamente:

| Cavi Direttamente Interrati  | Cavi in Tubo Corrugato (un circuito per tubo)  | Cavi in Aria   |
|--|--|--|
| Temperatura $\rightarrow k_1 = 1$  | Temperatura $\rightarrow k_1 = 1$  | Temperatura $\rightarrow k_1 = 0,79$   |
| Tipo di posa: stesso piano, circuiti a distanza 0,125m<br>$\rightarrow k_2 = 0,65$ | Tipo di posa: un circuito per tubo (condotti che si toccano)<br>$\rightarrow k_2 = 0,65$ | Tipo di posa: un circuito per tubo (condotti che si toccano)<br>$\rightarrow k_2 = 0,72$ |
| profondità = 1,6m $\rightarrow k_3 = 0,94$   | profondità = 1,6m $\rightarrow k_3 = 0,94$   |  |
| resistività terreno = 1,5 °K x m/W $\rightarrow k_4 = 1$                           | resistività terreno = 1,5 °K x m/W $\rightarrow k_4 = 1$                                 |  |

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

|   |   |   |
|---|---|---|
| fattore di sicurezza $\rightarrow k_s = 0,95$   | fattore di sicurezza $\rightarrow k_s = 0,95$   | fattore di sicurezza $\rightarrow k_s = 0,95$   |
| <b>TOTALE <math>\rightarrow k_{TOT} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 = 0,57</math></b> | <b>TOTALE <math>\rightarrow k_{TOT} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 = 0,57</math></b> | <b>TOTALE <math>\rightarrow k_{TOT} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 = 0,54</math></b> |

(\*) = il valore di portata del cavo solare è già dichiarato a 60°C, per cui in via cautelativa si considera un fattore di temperatura unitario.

Applicando al valore di corrente, l'indicazione fornita dal costruttore a seconda che sia direttamente interrata (512A) o in tubo (450A), calcoliamo la condizione peggiorativa:

| <b>Cavi Direttamente Interrati</b>  | <b>Cavi in Tubo Corrugato (un circuito per tubo)</b> | <b>Cavi in Tubo in aria</b>        |
|-------------------------------------|--|------------------------------------|
| Portata Cavo interrato Lorda = 578A | Portata Cavo interrato Lorda = 505A                  | Portata Cavo in aria Lorda = 765A  |
| $k_{TOT} = 0,57$                    | $k_{TOT} = 0,57$                                     | $k_{TOT} = 0,54$                   |
| <b>Portata Cavo Netta = 329,5A</b>  | <b>Portata Cavo Netta = 287,9A</b>                   | <b>Portata Cavo Netta = 413,1A</b> |

La condizione peggiorativa è nel caso di tubo corrugato interrato.

**La verifica ha esito positivo per ogni tratta della condizione:**

$$- I_N < I_Z$$

dove:

- $I_N$  è la corrente nominale della linea da proteggere;
- $I_Z$  è la portata del cavo.

| $I_N$   | Configurazione Cavo | $I_Z$  | Verifica |
|---------|---------------------|--------|----------|
| 256,98A | 3//(1x500)          | 287,9A | OK       |

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

#### 4.1.2.1.4 Coordinamento Protezioni

Ogni cavo di corrente continua sarà protetto direttamente da una coppia di fusibili direttamente installati all'interno dell'inverter, uno collegato in serie al polo positivo, uno in serie al polo negativo. I fusibili selezionati sono di taglia uguale per ogni stringa:

$$I_{FUS} = 315A - 1'500V$$

Il fusibile è un organo di protezione termico, il cui valore di intervento (e conseguente apertura del circuito) dipende dal fattore di declassamento per temperatura ambiente. Dato che il fusibile è all'interno dell'inverter, installato all'esterno e con grado di protezione pari a IP54, si calcola la corrente reale di intervento del fusibile pari a

$$I_{PROT} = 315A \times 0,875 = 275A$$

**La verifica del coordinamento ha esito positivo se è rispettata la seguente condizione:**


$$I_N < I_r < I_z$$

dove:

- $I_N$  è la corrente nominale di stringa, pari a 256,98 A;
- $I_r$  è la corrente di protezione, appena calcolata, pari a 275 A;
- $I_z$  è la corrente del cavo selezionato, calcolata nel precedente paragrafo, pari a 387,9 A.

Nel presente caso si ha:

$$256,98 < 275 < 387,9$$

**La portata di corrente e la verifica coordinamento di protezioni di tutte le linee è verificata. OK** 

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

#### 4.1.2.1.5 Verifica Caduta di Tensione

Per valutare la caduta di tensione sarà applicata la seguente formula:

$$\Delta V\% = \frac{n \times I_e \times L \times r}{V_e}$$

dove:

- $n$  una costante che dipende dal sistema di distribuzione, che nel caso di corrente continua è pari a 2;
- $I_e$  è la corrente del singolo SB, da determinare come multiplo della corrente di stringa (pari a 15,12 A), in base al numero di stringhe collegate;
- $L$  è la lunghezza del tratto di stringa espressa in km, computata per ogni singolo SB. Consideriamo la lunghezza massima ovvero 0,245 km;
- $r$  è la resistenza specifica del conduttore, in accordo con data sheet pari a 0,1 $\Omega$ /km @20°C che riportati a 60°C diventa pari a 0,116 $\Omega$ /km;
- $V_e$  è la tensione di esercizio dello SB, che come spiegato è variabile durante l'esercizio; si considera il valore di MPP, quindi pari a  $V_{MPP} = 1230,69V$ .

Si faccia riferimento alla tabella di calcolo della caduta di tensione e perdite su ogni singola tratta riportata

Dal risultato del calcolo della caduta di tensione si ottiene una media pari a:

$$\Delta V\%_{media} = 0,01\%$$

#### 4.1.2.1.6 Verifica Tenuta al corto circuito

Per valutare la tenuta al corto circuito (energia passante) sarà applicata la seguente formula:

$$S_{min} = \frac{I_{CC} \times \sqrt{t}}{k_C}$$

Il funzionamento della sezione in corrente continua dell'impianto agrovoltaiico prevede una corrente di corto circuito pari a  $20 \times 14,67 = 293,35A$  e quindi la verifica della tenuta al corto circuito altro non è che la verifica della portata del cavo, già verificata nei paragrafi precedenti.

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

#### 4.2 Cavi in corrente alternata (MT)

I cavi in Media Tensione sono necessari per collegare in parallelo le varie cabine di trasformazione sparse per il Campo Agrovoltico fino a raggiungere la cabina di consegna di ciascun impianto e successivamente la cabina primaria.

La media tensione verrà esercita con un sistema trifase isolato 3F, a tutti gli effetti un sistema IT. In accordo con il Sistema Normativo Internazionale, il funzionamento in IT:

- prevede tutte e tre le fasi (U-V-W) NON connesse a terra in nessun punto ed in nessun caso;
- prevede un coordinamento tra le protezioni di fase e di neutro, in modo che il cavo risulti sempre protetto.

È stata scelta una tipologia di cavo in funzione del tipo di collegamento da effettuare:

- cavo tipo ARP1H5EX per i collegamenti di distribuzione radiali di campo fino alla cabina di consegna;
- cavo tipo ARP1H5(AR)EX per il collegamento tra le cabine di consegna e la cabina primaria.

Non è oggetto di questa relazione il dimensionamento dell'elettrodotto di rete.

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |



#### 4.2.1 Elettrodotto Utente MT interno all'impianto

I cavi saranno installati all'interno di tubo corrugato, (un tubo per cavi MT).

Come già specificato nel paragrafo precedente è scelto il cavo in Alluminio tipo ARP1H5EX, mentre la configurazione prevista sarà in funzione del numero di cabine del quale è necessaria trasportare l'energia. Nelle distribuzioni secondarie saranno previste le seguenti configurazioni:

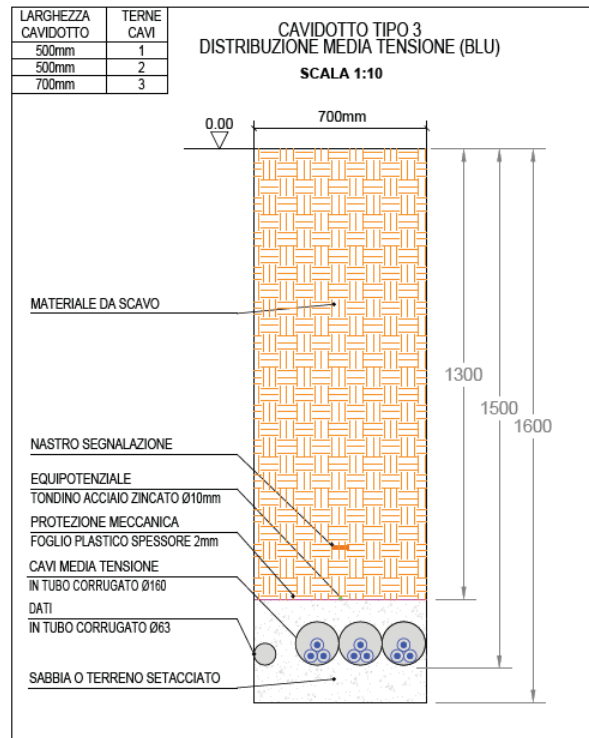
|   |   |                             |
|---|---|-----------------------------|
| Collegamento 1 cabina di trasformazione | → | 3// (1x120) mm <sup>2</sup> |
| Collegamento 2 cabine di trasformazione | → | 3// (1x300) mm <sup>2</sup> |

In fase di progettazione esecutiva/costruttiva, potranno essere ottimizzate le configurazioni cavi, prevedendo cavi con sezione inferiore in funzione della distanza del collegamento e della corrente da trasportare.

Di seguito vengono riportate le principali caratteristiche del cavo selezionato.

|   |  |
|---|--|
| <b>Modello</b>                                | ARP1H5EX   |
| <b>Conduttore</b>                             | Corda compatta a fili di alluminio (CEI 20-29, classe 2) |
| <b>Isolante</b>                               | HPTE (elastomero termoplastico)                          |
| <b>Guaina</b>                                 | Polietilene  |
| <b>Temperatura di esercizio</b>               | 0 – 105°C  |
|   |  |
| <b>Tensione nominale U<sub>0</sub>/U (Um)</b> | 12/20 (24) kV  |
|   |  |
| <b>Sezione conduttore</b>                     | 120 / 300  |
| <b>Portata corrente [A]</b>                   | 120 mm <sup>2</sup> : 291 A                              |
|   | 300 mm <sup>2</sup> : 483 A                              |

|                  |             |                    |
|------------------|-------------|--------------------|
| 00               | 12/12/24    | Prima Emissione    |
| <b>Revisione</b> | <b>Data</b> | <b>Descrizione</b> |



La sezione tipica di questi cavidotti, interni al campo, è essenzialmente costituita da una sezione larga 500/700mm e profonda 1'600mm, che sarà riempita con:

- Sabbia di fiume nella parte più profonda per evitare che i cavi direttamente interrati possano essere a contatto diretto con sassi e/o detriti che ne possano scongiurare l'integrità durante tutti gli anni di esercizio, con:
  - uno spessore pari a circa 100mm sul fondo;
  - uno spessore pari a circa 200mm nel quale verranno installati cavi e corrugati in base alla specificità di ogni tratta;
- Un foglio plastico per la separazione tra strato inferiore e strato superiore, avente anche la funzione di protezione meccanica;
- Terra di riporto per il riempimento dello strato superiore, fino al livellamento nativo della sezione.

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

#### 4.2.2 Elettrodotto Utente MT esterno all'impianto

La Media Tensione verrà esercita con un Sistema Trifase 3F-Neutro Isolato (collegamento lato secondario del trasformatore BT/MT a triangolo).

I cavi saranno installati all'interno di tubo corrugato, (un tubo per cavi MT).

Il cavo selezionato è il cavo in Alluminio tipo ARP1H5EX, mentre la configurazione prevista sarà:

Cavidotto Utente MT Esterno → 3// (1x300) mm<sup>2</sup>

In fase di progettazione esecutiva/costruttiva, potrà essere ottimizzata la configurazione cavi, prevedendo cavi con sezione inferiore in funzione della distanza del collegamento e della corrente da trasportare.

Di seguito vengono riportate le principali caratteristiche del cavo selezionato.

|   |  |
|---|--|
| <b>Modello</b>                                | ARP1H5(AR)EX   |
| <b>Conduttore</b>                             | Corda compatta a fili di alluminio (CEI 20-29, classe 2) |
| <b>Isolante</b>                               | HPTE (elastomero termoplastico)                          |
| <b>Guaina</b>                                 | Polietilene (DMP2)                                       |
| <b>Temperatura di esercizio</b>               | 0 – 90°C   |
|   |  |
| <b>Tensione nominale U<sub>o</sub>/U (Um)</b> | 12/20 (24) kV  |
|   |  |
| <b>Sezione conduttore</b>                     | 300 mm <sup>2</sup>                                      |
| <b>Portata corrente [A]</b>                   | 300 mm <sup>2</sup> : 483 A                              |

Non verranno considerati gli elettrodotti che dalla cabina di consegna veicoleranno l'energia alla cabina primaria, in quanto il dimensionamento dei cavi è stato definito e comunicato dal gestore della rete E-Distribuzione.

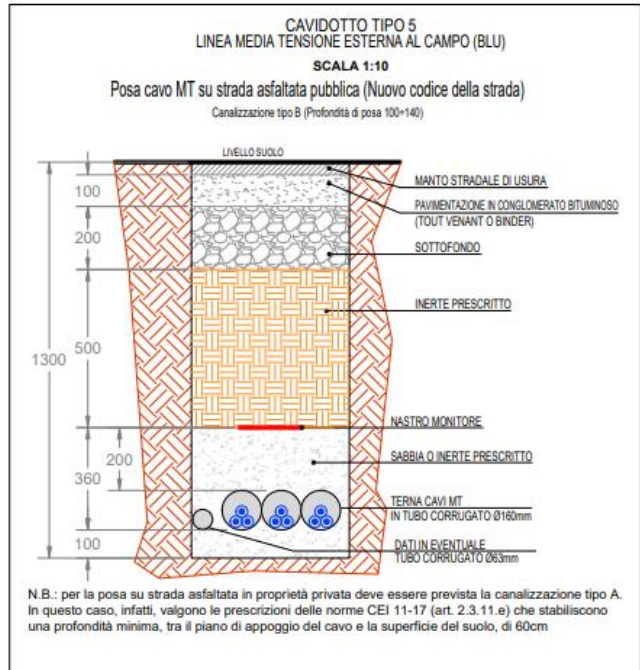
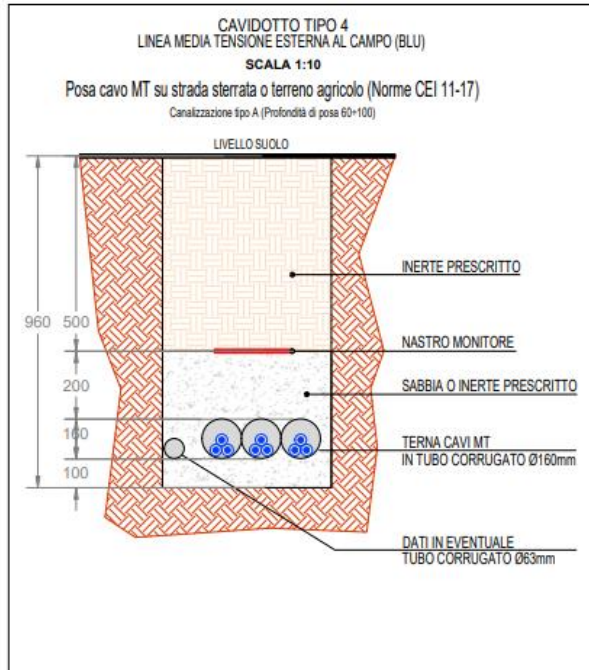
La sezione tipica di questi cavidotti è essenzialmente costituita da una sezione larga da 700mm e profonda 960mm/1'300mm, che sarà riempita con:

- Sabbia di fiume nella parte più profonda per evitare che i cavi direttamente interrati possano essere a contatto diretto con sassi e/o detriti che ne possano scongiurare l'integrità durante tutti gli anni di esercizio, con:
  - uno spessore pari a circa 100mm sul fondo;
  - uno spessore pari a circa 360/380mm nel quale verranno installati cavi e corrugati in base alla specificità di ogni tratta;
- Un foglio plastico per la separazione tra strato inferiore e strato superiore, avente anche la funzione di protezione meccanica;
- Terra di riporto per il riempimento dello strato superiore, fino al livellamento nativo della sezione;

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

- Nel caso di posa su strada asfaltata lo scavo in parte verrà riempito con sottofondo stradale, binder e strato di usura.

Le modalità verranno definite dall'ente gestore della strada.



In talune sezioni, ed in particolare in corrispondenza dell'attraversamento delle interferenze lungo il percorso, il cavidotto sarà differente, per cui ogni terna di cavi entrerà in un tubo corrugato e verrà installato posato con la tecnica Trivellazione Orizzontale Controllata (di seguito TOC). Nell'elaborato grafico dedicato (*Cavidotto MT – Interferenze su CTR*) sono state individuate le interferenze del percorso del cavidotto MT ed indicata la modalità di risoluzione di tale interferenza.

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

#### 4.2.2.1 Condizioni di esercizio

In questo paragrafo vengono identificate le condizioni di esercizio elettriche e ambientali, necessarie per procedere con la verifica del dimensionamento.

##### 4.2.2.1.1 Tensione di esercizio

La tensione di esercizio è 15'000V.

La variazione di tensione ammessa sulla rete di Alta Tensione (CEI 0-16) è 90%  $V_N$  ... 110%  $V_N$ .

Tuttavia, viene richiesto di essere in grado di rimanere connessi alla rete, variando la potenza erogata come previsto dalla sovra-menzionata norma, in condizioni eccezionali di funzionamento della rete ovvero quando nel punto di connessione la tensione, per periodi di durata limitata, può variare nel campo di 85%  $V_N$  ... 115%  $V_N$ .

In conclusione, i valori di riferimento della tensione di esercizio sono:

$$V_e = 15'000V, \text{ con intervallo funzionamento su rete AT pari a } 85\% \dots 115\% V_e$$

##### 4.2.2.1.2 Verifica portata di corrente

La corrente nominale di ogni singola tratta è determinata dalla potenza trasmessa.

Per valutare la portata in corrente devono essere determinati su ogni tratta i coefficienti di declassamento della portata in funzione delle condizioni di installazione.

I coefficienti di declassamento sono in funzione della modalità di posa, che per i cavi di Media Tensione sono:

- direttamente interrati;
- all'interno di tubo corrugato.

Sebbene i cavi MT verranno posati in tubo corrugato, si valuteranno entrambe le opzioni definendo il dimensionamento nel caso peggiore.

I coefficienti sono rispettivamente:

| Cavi Direttamente Interrati  | Cavi in Tubo Corrugato (un circuito per tubo)  |
|--|--|
| Temperatura $\rightarrow k_1 = 1$  | Temperatura $\rightarrow k_1 = 1$  |
| Tipo di posa: 3 circuiti $\rightarrow k_2 = 0,69$<br>2 circuiti $\rightarrow k_2 = 0,80$<br>1 circuiti $\rightarrow k_2 = 1,00$  | Tipo di posa: 3 circuiti $\rightarrow k_2 = 0,75$<br>2 circuiti $\rightarrow k_2 = 0,85$<br>1 circuito $\rightarrow k_2 = 1,00$  |
| profondità = 1,6 m $\rightarrow k_3 = 0,95$  | profondità = 1,6 m $\rightarrow k_3 = 0,95$  |
| resistività terreno = 1 °K x m/W $\rightarrow k_4 = 0,92$  | resistività terreno = 1 °K x m/W $\rightarrow k_4 = 0,92$  |
| fattore di sicurezza $\rightarrow k_5 = 0,90$  | fattore di sicurezza $\rightarrow k_5 = 0,90$  |
| <b>TOTALE <math>\rightarrow k_{TOT} = 0,54</math> (3 circuiti)</b><br><b><math>k_{TOT} = 0,69</math> (2 circuiti)</b><br><b><math>k_{TOT} = 0,79</math> (1 circuiti)</b> | <b>TOTALE <math>\rightarrow k_{TOT} = 0,59</math> (3 circuiti)</b><br><b><math>k_{TOT} = 0,67</math> (2 circuiti)</b><br><b><math>k_{TOT} = 0,79</math> (1 circuiti)</b> |

La condizione peggiorativa è quindi del tratto con i cavi direttamente interrati con tre terne. In via cautelativa, per il dimensionamento, si utilizza il coefficiente  $K_{tot}$  relativo alla condizione peggiorativa per tutti i cavidotti in esame.

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

Sebbene gli elettrodotti esterni all'impianto siano caratterizzati da una profondità di posa inferiore a quella degli elettrodotti interni all'impianto, si considererà la profondità di posa peggiore, ovvero 1.6m.

**La verifica ha esito positivo se per ogni tratta si verifica la condizione:**

$$I_N < I_Z$$

dove:

- $I_N$  è la corrente nominale della linea da proteggere;
- $I_Z$  è la portata del cavo.

| TRATTA |      | L<br>[km] | Tipologia<br>Cavo | Configurazione cavo | Pn<br>[kW] | In<br>[A] | Ilorda<br>[A] | ktot | Iz<br>[A] | Iz>In |
|--------|------|-----------|-------------------|---------------------|------------|-----------|---------------|------|-----------|-------|
| C1.1   | C1.2 | 0,57      | ARE4H5EX          | 3//(1x120)          | 3000       | 115,6     | 291,0         | 0,54 | 157,9     | OK    |
| C1.2   | C1   | 3,90      | ARE4H5EX          | 3//(1x300)          | 5750       | 221,6     | 483,0         | 0,54 | 262,2     | OK    |
|        |      |           |                   |                     |            |           |               |      |           |       |
| C2.1   | C2.2 | 0,32      | ARE4H5EX          | 3//(1x120)          | 3000       | 115,6     | 291,0         | 0,54 | 157,9     | OK    |
| C2.2   | C2   | 4,35      | ARE4H5EX          | 3//(1x300)          | 5750       | 221,6     | 483,0         | 0,54 | 262,2     | OK    |
|        |      |           |                   |                     |            |           |               |      |           |       |
| C3.1   | C3.2 | 0,13      | ARE4H5EX          | 3//(1x120)          | 2750       | 106,0     | 291,0         | 0,54 | 157,9     | OK    |
| C3.2   | C3.2 | 4,52      | ARE4H5EX          | 3//(1x300)          | 5750       | 221,6     | 483,0         | 0,54 | 262,2     | OK    |
|        |      |           |                   |                     |            |           |               |      |           |       |

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

## 4.2.2.1.3 Coordinamento Protezioni

Nella sezione di verifica della portata di corrente, dovrà essere verificato anche il coordinamento protezioni.

Il criterio per il settaggio delle protezioni lato MT è il seguente:

Relè di protezione elettronica

$$51> \rightarrow I \geq 1,1 I_N \quad t=1s$$

$$51>> \rightarrow I \geq 3 I_N \quad t=430ms$$

$$51>>> \rightarrow I > 5 I_N \quad t=100ms$$

La verifica del coordinamento ha esito positivo se è rispettata la seguente condizione:

$$I_N < I_r < I_Z$$

dove:

- $I_N$  è la corrente nominale della linea da proteggere;
- $I_r$  è la corrente regolata, ovvero settaggio della protezione 51>;
- $I_Z$  è la corrente del cavo, ovvero quella calcolata con la portata del cavo.

Nel presente caso si ha:

| TRATTA |      | L<br>[km] | Tipologia<br>Cavo | Configurazione cavo | Pn<br>[kW] | In<br>[A] | Ir<br>[A] | Iz<br>[A] | Verifica |
|--------|------|-----------|-------------------|---------------------|------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| C1.1   | C1.2 | 0,57      | ARE4H5EX          | 3//(1x120)          | 3000       | 115,6     | < 127,2   | < 157,9   | OK       |
| C1.2   | C1   | 3,90      | ARE4H5EX          | 3//(1x300)          | 5750       | 221,6     | < 243,7   | < 262,2   | OK       |
| C2.1   | C2.2 | 0,32      | ARE4H5EX          | 3//(1x120)          | 3000       | 115,6     | < 127,2   | < 157,9   | OK       |
| C2.2   | C2   | 4,35      | ARE4H5EX          | 3//(1x300)          | 5750       | 221,6     | < 243,7   | < 262,2   | OK       |
| C3.1   | C3.2 | 0,13      | ARE4H5EX          | 3//(1x120)          | 2750       | 106,0     | < 116,6   | < 157,9   | OK       |
| C3.2   | C3.2 | 4,52      | ARE4H5EX          | 3//(1x300)          | 5750       | 221,6     | < 243,7   | < 262,2   | OK       |

La portata di corrente e la verifica coordinamento di protezioni di tutte le linee è verificata. **OK** ✓

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

## 4.2.2.1.4 Verifica Caduta di Tensione

Per valutare la caduta di tensione sarà applicata la seguente formula:

$$\Delta v\% = \frac{\sqrt{3} \times I_N \times L \times (r \times \cos\phi + x \times \sin\phi)}{V_e}$$

dove:

- $I_N$  è la corrente di riferimento per la tratta, calcolata come multiplo della corrente di ogni cabina;
- $L$  è la lunghezza della tratta;
- $r$  è la resistenza specifica, espressa in  $\Omega/\text{km}$ , ricavata dalla tipologia di cavo utilizzata;
- $x$  è la reattanza specifica, espressa in  $\Omega/\text{km}$ , ricavata dalla tipologia di cavo utilizzata;
- $\cos\phi$  è il fattore di potenza del carico, posto pari a 0,90 per il tratto MT;
- $\sin\phi$  si deriva dal fattore di potenza;
- $V_e$  è la tensione di esercizio, pari a 15'000V.

Dovrà essere calcolata la caduta di tensione di ogni singola linea MT, ovvero dalla cabina consegna all'ultima cabina di trasformazione di ogni linea radiale, sommando i vari contributi di ogni tratta che costituisce la linea MT.

La verifica della caduta di tensione ha esito positivo se è rispettata la seguente condizione:

$$\Delta v\% < 3\%$$

| TRATTA |      | L<br>[km] | Tipologia<br>Cavo | Configurazione cavo | Pn<br>[kW] | In<br>[A] | r<br>[Ω/km] | x<br>[Ω/km] | Δvx<br>[V] | ΔVtot<br>[V] | Δvtot<br>[%] | Verifica |
|--------|------|-----------|-------------------|---------------------|------------|-----------|-------------|-------------|------------|--------------|--------------|----------|
| C1.1   | C1.2 | 0,57      | ARE4H5EX          | 3//(1x120)          | 3000       | 115,6     | 0,328       | 0,12        | 39,616     | 285,646      | 1,904%       | OK       |
| C1.2   | C1   | 3,90      | ARE4H5EX          | 3//(1x300)          | 5750       | 221,6     | 0,132       | 0,105       | 246,030    |              |              |          |
| C2.1   | C2.2 | 0,32      | ARE4H5EX          | 3//(1x120)          | 3000       | 115,6     | 0,328       | 0,12        | 18,893     | 293,311      | 1,955%       | OK       |
| C2.2   | C2   | 4,35      | ARE4H5EX          | 3//(1x300)          | 5750       | 221,6     | 0,132       | 0,105       | 274,418    |              |              |          |
| C3.1   | C3.2 | 0,13      | ARE4H5EX          | 3//(1x120)          | 2750       | 106,0     | 0,328       | 0,12        | 7,036      | 292,178      | 1,948%       | OK       |
| C3.2   | C3.2 | 4,52      | ARE4H5EX          | 3//(1x300)          | 5750       | 221,6     | 0,132       | 0,105       | 285,142    |              |              |          |

Si può quindi applicare la formula del calcolo della caduta di tensione per ogni singola tratta:

$$\Delta v\% < 3\% = \Delta v\%_{MAX}$$

Il dimensionamento del cavo MT rispetta le condizioni di massima caduta di tensione della tratta. **OK** 

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |



## 4.2.2.1.5 Verifica Tenuta al corto circuito

Per valutare la tenuta al corto circuito (energia passante) sarà applicata la seguente formula:

$$S_{min} = \frac{I_{CC} \sqrt{t}}{k_C}$$

dove:

- $I_{CC}$  è la corrente di corto circuito sulla tratta in analisi, nell'ambito del presente dimensionamento è stato considerato un valore conservativo pari a 16 kA;
- $t$  è il tempo di estinzione del guasto, pari a 170ms (100ms ritardo intenzionale del relè protezione + 70ms tempo medio dell'effettiva apertura dei circuiti dell'interruttore dal comando del relè);
- $K_C$  è un fattore il cui valore dipende dal materiale del conduttore, dal materiale isolante e dal tipo di conduttore utilizzato; nel presente caso pari a 116.

Dovrà essere verificata la sezione di ogni singola linea MT, prendendo come riferimento la tratta con sezione minore.

**La verifica della tenuta al corto circuito ha esito positivo se è rispettata la seguente condizione:**

$$S_{tratta} > S_{min}$$

Si può quindi applicare la formula di verifica di tenuta all'energia passante:

$$S_{min} = \frac{I_{CC} \sqrt{t}}{k_C} = \frac{16'000 \sqrt{0,170}}{116} = 56,8 mm^2$$

e quindi,

$$S_{tratta} = 95 > 56,8 = S_{min}$$

**Il dimensionamento del cavo MT rispetta le condizioni di tenuta al corto circuito. OK** 

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

### 4.3 Altri cavi

Di seguito l'indicazione delle caratteristiche degli altri cavi previsti all'interno dell'Impianto Agrovoltico.

#### 4.3.1 Cavi nella Cabina di Trasformazione MT/BT

La cabina di trasformazione MT/BT è quell'insieme di componenti atti a rendere disponibile l'energia prodotta da un certo numero di inverter in Media Tensione. I componenti principali sono:

- Inverter centralizzato, ovvero la macchina elettrica che effettua la conversione dell'energia prodotta da corrente continua ad alternata;
- Trasformatore MT/BT, ovvero la macchina elettromeccanica che trasforma l'energia resa disponibile nel QPCA da Bassa a Media Tensione;
- QMT (Quadro Media Tensione), ovvero il quadro che rende disponibile i cavi MT per la distribuzione MT.

Sono previste 6 cabine di trasformazione.

La fornitura ed il dimensionamento dei cavi elettrici all'interno di ogni cabina sono da considerarsi come inclusi nella fornitura della cabina di trasformazione.

#### 4.3.2 Cavi Alimentazione Trackers

I cavi di alimentazione trackers sono cavi di bassa tensione utilizzati per alimentare i motori presenti sulle strutture, responsabili del movimento delle strutture attorno all'asse Nord-Sud, in modo che i moduli fotovoltaici ad essa fissati, siano sottoposti al massimo irraggiamento lungo tutto il movimento giornaliero del sole.

Questi cavi sono alloggiati sia sulle strutture che interrati. Si utilizzerà un cavo per energia, isolato con gomma etilpropilenica ad alto modulo di qualità G7, sotto guaina di PVC, non propagante l'incendio, a ridotta emissione di gas corrosivo e con una miscela che lo renda installabile ad aria aperta.

#### 4.3.3 Cavi di sicurezza e sorveglianza

Il sistema di sicurezza e videosorveglianza utilizza:

- Telecamere per vigilare l'area della recinzione (motion detection con illuminazione IR notturna);
- Telecamere tipo DOME nei punti strategici ed in corrispondenza delle cabine di trasformazione;
- Sistema di illuminazione da utilizzare come deterrente (nel caso il motion detection rilevi un'intrusione, l'illuminazione relativa a quella zona viene attivata).

#### 4.3.4 Cavi Dati

I cavi dati sono i cavi di trasmissione di tutti i dati dei vari sistemi.

Le tipologie di cavo possono essere di due tipi:

- cavo RS485 per tratte di cavo di lunghezza limitata (tipicamente <100m);
- cavo in fibra ottica, per tratti di cavo più lunghi.

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |

## 5 Protezioni elettriche

### Protezione contro cto-cto

Per la porzione di rete elettrica in corrente continua, in caso di corto circuito la corrente ( $I_{sc}$ ) è limitata a valori di poco superiori alla corrente di massima potenza ( $I_{mpp}$ ) dei moduli fotovoltaici. Tali valori sono dichiarati dal costruttore e riportati sul datasheet del modulo FV. A protezione dei circuiti sono presenti, in ciascun inverter di stringa, tre interruttori DC.

Nella sezione in corrente alternata la protezione è costituita da appositi interruttori scatolati (MCCB), che avranno anche funzione di Interruttore Generale di Generatore (Inverter), con soglie regolabili in funzione della propria corrente nominale 250A

### Protezione dai contatti diretti

La protezione dai contatti diretti è assicurata dall'implementazione dei seguenti accorgimenti:

- Installazione di prodotti con marcatura CE (secondo la direttiva CEE 73/23);
- Utilizzo di componenti con adeguata protezione meccanica (IP);
- Collegamenti elettrici effettuati mediante cavi rivestiti con guaine esterne protettive, con adeguato livello di isolamento e alloggiati in condotti porta-cavi idonei in modo da renderli non direttamente accessibili (quando non interrati).

### Protezione dai contatti indiretti

Le masse delle apparecchiature elettriche situate all'interno delle varie cabine sono collegate all'impianto di terra principale dell'impianto.

Per i generatori fotovoltaici viene adottato il doppio isolamento (apparecchiature di classe II). Tale soluzione consente, secondo la norma CEI 64-8, di non prevedere il collegamento a terra dei moduli e delle strutture che non sono classificabili come masse.

### Protezione dalle scariche atmosferiche

L'installazione dell'impianto agrovoltaiico nell'area, prevedendo mediamente strutture di altezza contenuta e omogenee tra loro, non altera il profilo verticale dell'area medesima. Ciò significa che le probabilità della fulminazione diretta non sono influenzate in modo sensibile. Considerando inoltre che il sito non sarà presidiato, la protezione della fulminazione diretta è costituita da un'adeguata rete di terra che garantirà l'equipotenzialità delle masse.

Per quanto riguarda la fulminazione indiretta, bisogna considerare che l'abbattersi di un fulmine in prossimità dell'impianto può generare disturbi di carattere elettromagnetico e tensioni indotte sulle linee dell'impianto, tali da provocare guasti e danneggiarne i componenti. Per questo motivo gli inverter sono dotati di un proprio sistema di protezione da sovratensioni, sia sul lato in corrente continua, sia su quello in corrente alternata.

|           |          |                 |
|-----------|----------|-----------------|
| 00        | 12/12/24 | Prima Emissione |
| Revisione | Data     | Descrizione     |