

IMPIANTO AGRO-FOTOVOLTAICO "SCLAFANI"

REGIONE SICILIANA
CITTÀ METROPOLITANA DI PALERMO
COMUNE DI SCLAFANI BAGNI



OGGETTO:

REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO AGRO-FOTOVOLTAICO
DI POTENZA IN DC PARI A 50,646 MWp (49,008 MW IN IMMISSIONE)
E DI TUTTE LE OPERE ED INFRASTRUTTURE CONNESSE



PROGETTO DEFINITIVO

ELABORATO:
RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE
IMPIANTO DI PRODUZIONE

COMMITTENTE:	SVILUPPATORE:	PROGETTISTA:
SCLAFANI SRL	 TERRA AUREA	 Dottore Magistrale in Ingegneria LUIGI CORSARO Ingegnere Industriale SEZIONE A N° ISCRIZIONE 22986
REVISIONE: Rev 00	CODICE IMPIANTO: SCLA - 01	CODICE ELABORATO: CF.09
Formato: A4	CP TERNA: 202201929	Data: 27/06/2023

TIMBRO DELL'ENTE AUTORIZZANTE:

INDICE

1	PREMESSA	4
2	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	4
3	PLANIMETRIA E UBICAZIONE	6
4	IMPIANTO AGRO-FOTOVOLTAICO	6
4.1	Layout e Configurazione d’Impianto	7
4.2	Principali componenti progettuali	8
4.2.1	Modulo FV	8
4.2.2	Tracker mono-assiale	8
4.2.3	Quadro di Stringa	10
4.2.4	Power Station	12
5	CRITERI DI DIMENSIONAMENTO	13
6	CONNESSIONI ELETTRICHE	14
6.1	Cavo Solare H1Z2Z2-K	14
6.2	Cavo BT (DC) ARG16R16	15
6.3	Cavo MT ARE4H5E – 18/30 kV	16
7	DIMENSIONAMENTO CAVI ELETTRICI	17
7.1	Cavo DC: Moduli fotovoltaici - Quadro di stringa	17
7.2	Cavo DC: Quadro di Stringa – Inverter Centralizzati	20
7.3	Cavo MT: Inverter – Cabina di raccolta – Sottostazione utente	22

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1. Inquadramento su IGM</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2. Inquadramento Campo Fotovoltaico su Ortofoto</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3. Tracker 2P in posizione di riposo - Vista Longitudinale e Sezione Trasversale</i>	<i>9</i>
<i>Figura 4. Tracker 2P in posizione di massima inclinazione - Vista Longitudinale e Sezione Trasversale</i>	<i>10</i>
<i>Figura 5. Cavo Solare H1Z2Z2-K.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 6. Cavo BT ARG16R16 0,6/1 kV.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 7. Immagine indicativa del tipo di Cavo</i>	<i>16</i>
<i>Figura 8. Modalità di Posa (CEI 11-17).....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9. Datasheet cavo H1Z2Z2-K.....</i>	<i>19</i>

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 1. Caratteristiche generali d'impianto</i>	<i>7</i>
<i>Tabella 2. Dati tecnici Modulo FV.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabella 3. Tracker/Stringa.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabella 4. Quadri di stringa.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabella 5. Inverter interni alle Power Station (PS)</i>	<i>12</i>
<i>Tabella 6. Power Station.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabella 7. Riepilogo Dimensionamento Elettrico Campo Fotovoltaico</i>	<i>14</i>
<i>Tabella 8. Dati per Dimensionamento cavi DC per collegamento moduli FV</i>	<i>18</i>
<i>Tabella 9. Dati cavo H1Z2Z2-K scelto</i>	<i>20</i>
<i>Tabella 10. Dati per Dimensionamento cavi BT (DC) per collegamento Quadri di Stringa.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabella 11. Dati cavo ARG16R16 scelto</i>	<i>21</i>
<i>Tabella 12. Dati di Progetto per Dimensionamento Elettrico Cavi MT</i>	<i>23</i>
<i>Tabella 13. Dimensionamento Cavi MT</i>	<i>24</i>
<i>Tabella 14. Caratteristiche meccaniche ed elettriche del Cavo MT in funzione della Sezione scelta.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabella 15. Perdite d'impianto in MT</i>	<i>24</i>

1 PREMESSA

Il presente studio è riferito al progetto per la costruzione e l’esercizio di un impianto agro-fotovoltaico di produzione di energia elettrica da fonte solare, localizzato nel Comune di Sclafani Bagni (PA).

In particolare, l’impianto in progetto ha una potenza di picco pari a 50,646 MWp e una potenza nominale di 49,008 MW.

La Soluzione Tecnica Minima Generale elaborata dall’ente gestore prevede che l’impianto: *“venga collegato in antenna a 150 kV con la sezione a 150 kV di una nuova stazione elettrica di trasformazione (SE) 380/150 kV della RTN, da inserire in entra – esce sul futuro elettrodotto RTN a 380 kV della RTN “Chiaramonte Gulfi - Ciminna”, previsto nel Piano di Sviluppo Terna, e da ricollegare alla linea 150 kV compresa tra le stazioni RTN di Ciminna e Cammarata”*.

Il campo agro-fotovoltaico è suddiviso in 7 sottocampi, costituiti da moduli fotovoltaici mono-facciali aventi potenza nominale pari a 700 Wp cadauno ed installati su strutture ad inseguimento solare mono-assiali *“tracker”*; ogni sottocampo prevede una stazione di conversione e trasformazione dell’energia elettrica detta *“Power Station”*. Tutte le Power Station portano la potenza prodotta ad una Cabina di Raccolta e Misura a 30 kV. Infine, tramite delle linee elettriche a 30 kV in cavo interrato si ottiene l’interconnessione della Cabina di Raccolta e Misura con la Sottostazione elettrica d’utente *“SSne”* che permetterà la connessione alla futura SE di Terna 380/150/36 kV.

Il progetto è sviluppato dalla società Sclafani s.r.l., avente sede legale in Via Quintino Sella 77 - 90139 Palermo (PA), P.IVA 07075810825.

2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Gli impianti devono essere realizzati a regola d’arte, come prescritto dalle normative vigenti, ed in particolare dal D.M. 22 gennaio 2008, n. 37. Le caratteristiche degli impianti stessi, nonché dei loro componenti, devono corrispondere alle norme di legge e di regolamento vigenti alla data di esecuzione dei lavori, tra i quali:

- **CEI 64-8:** Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata 1500 V in corrente continua;

- **CEI 11-20 e varianti:** Impianti di produzione di energia elettrica e gruppi di continuità collegati a reti di I e II categoria;
- **CEI 82-25:** Guida alla realizzazione di sistemi di generazione fotovoltaica collegati;
- **CEI EN 60904-1:** Dispositivi fotovoltaici -Parte 1: Misura delle caratteristiche fotovoltaiche tensione - corrente;
- **CEI EN 60904-2:** Dispositivi fotovoltaici -Parte 2: Prescrizione per le celle fotovoltaiche di riferimento;
- **CEI EN 60904-3:** Dispositivi fotovoltaici -Parte 3: Principi di misura per sistemi solari fotovoltaici per uso terrestre e irraggiamento spettrale di riferimento;
- **CEI EN 61727:** Sistemi fotovoltaici (FV) – Caratteristiche dell'interfaccia di raccordo con la rete;
- **CEI EN 61215:** Moduli fotovoltaici in silicio cristallino per applicazioni terrestri. Qualifica del progetto e omologazione del tipo;
- **CEI EN 61000-3-2:** Compatibilità elettromagnetica (EMC) - Parte 3: Limiti Sezione 2: Limiti per le emissioni di corrente armonica (apparecchiature con corrente di ingresso = 16 A per fase);
- **Decreto 28 luglio 2005** “Criteri per l’incentivazione della produzione di energia elettrica mediante conversione fotovoltaica della fonte solare”, modificato e integrato con il Decreto ministeriale 6 febbraio 2006 e dal DM del 19 febbraio 2007.

Circa la sicurezza e la prevenzione degli infortuni, si ricorda:

- **il D. Lgs. 81/08** per la sicurezza e la prevenzione degli infortuni sul lavoro.

Per quanto riguarda il collegamento alla rete e l’esercizio dell’impianto, conformi alle seguenti normative e leggi:

- **norma CEI 0-16** per il collegamento alla rete pubblica;
- delibere dell’AEEG applicabili;
- guide tecniche specifiche emanate da E-distribuzione S.p.a. e TERNA per la connessione alla rete di distribuzione MT.

I riferimenti di cui sopra possono non essere esaustivi; ulteriori disposizioni di legge, norme e deliberazioni in materia, anche se non espressamente richiamati, si considerano applicabili.

3 PLANIMETRIA E UBICAZIONE

Il sito in oggetto è situato nel Comune di Sclafani Bagni (PA). Mentre il cavidotto MT interrato per la connessione dell’impianto alla rete attraverserà i Comuni di Sclafani Bagni (PA), Alia (PA) e Castronuovo di Sicilia (PA). L’ubicazione complessiva delle opere e della SE 380/150/36 kV, si rileva dall’allegato “*Inquadramento generale su IGM e Coordinate impianto*”:

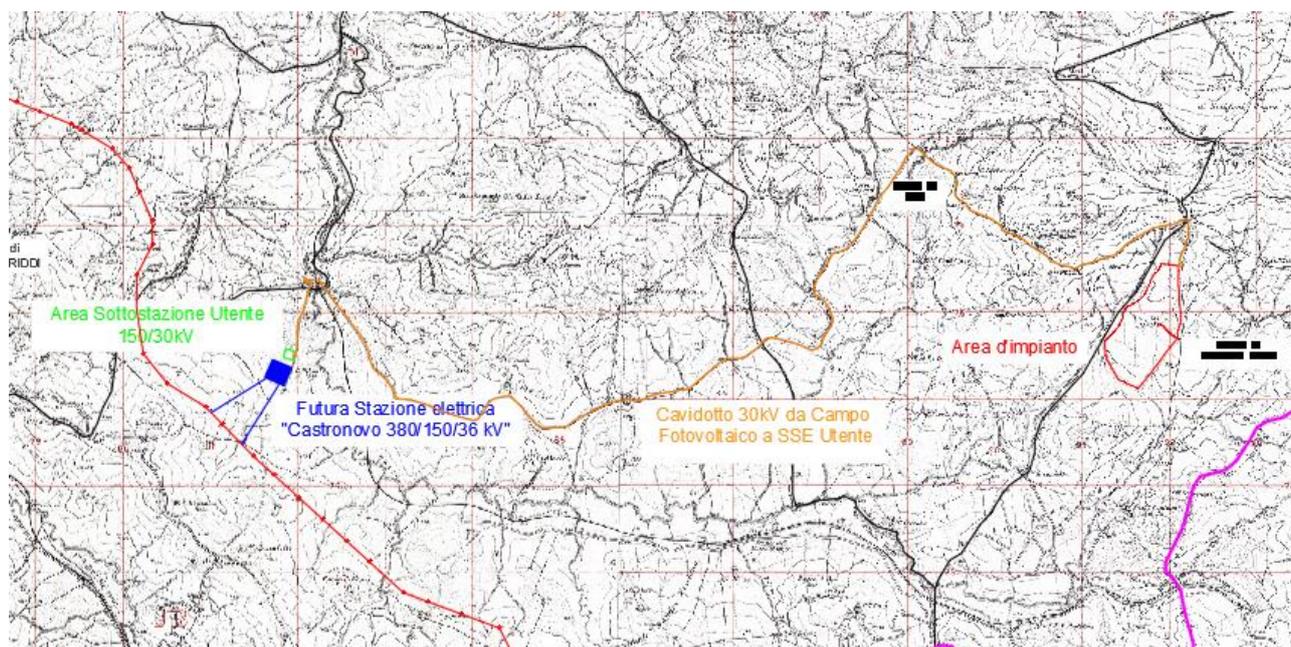


Figura 1. Inquadramento su IGM

4 IMPIANTO AGRO-FOTOVOLTAICO

L’impianto prevede l’utilizzo di moduli fotovoltaici mono-facciali montati su strutture atte a garantire la massima captazione di irraggiamento seguendo il percorso solare e consentendo, di conseguenza, ai moduli di essere sempre nella posizione ottimale di lavoro. Tali strutture sono dette “tracker” o “inseguitori solari”, proprio per questa loro caratteristica funzionale.

L’impianto è dimensionato considerando il Backtracking, il quale consente di ridurre le perdite per auto-ombreggiamento, cioè le perdite da ombreggiamento indotto dai tracker stessi alle file retrostanti. Ciò avviene per mezzo di un sistema logico-adattivo che gestisce contemporaneamente piccoli gruppi di tracker, al fine di ottimizzare dunque le prestazioni del campo FV.

Nella seguente tabella si riportano le principali caratteristiche generali d’impianto:

Temperatura Verifica minima (°C)	0
Temperatura Verifica max (°C)	60
Soluzione Progettuale	Tracker in configurazione 2P (Portrait)
Margine altezza tracker dal suolo alla massima inclinazione [m]	0,50
Max Inclinazione Tracker [°]	±60
Tipologia	Agro-Fotovoltaico
Pitch [m]	9,3

Tabella 1. Caratteristiche generali d'impianto

4.1 Layout e Configurazione d’Impianto

Di seguito è riportato un estratto del layout d’impianto, in cui sono evidenziati tutti i principali componenti di progetto:

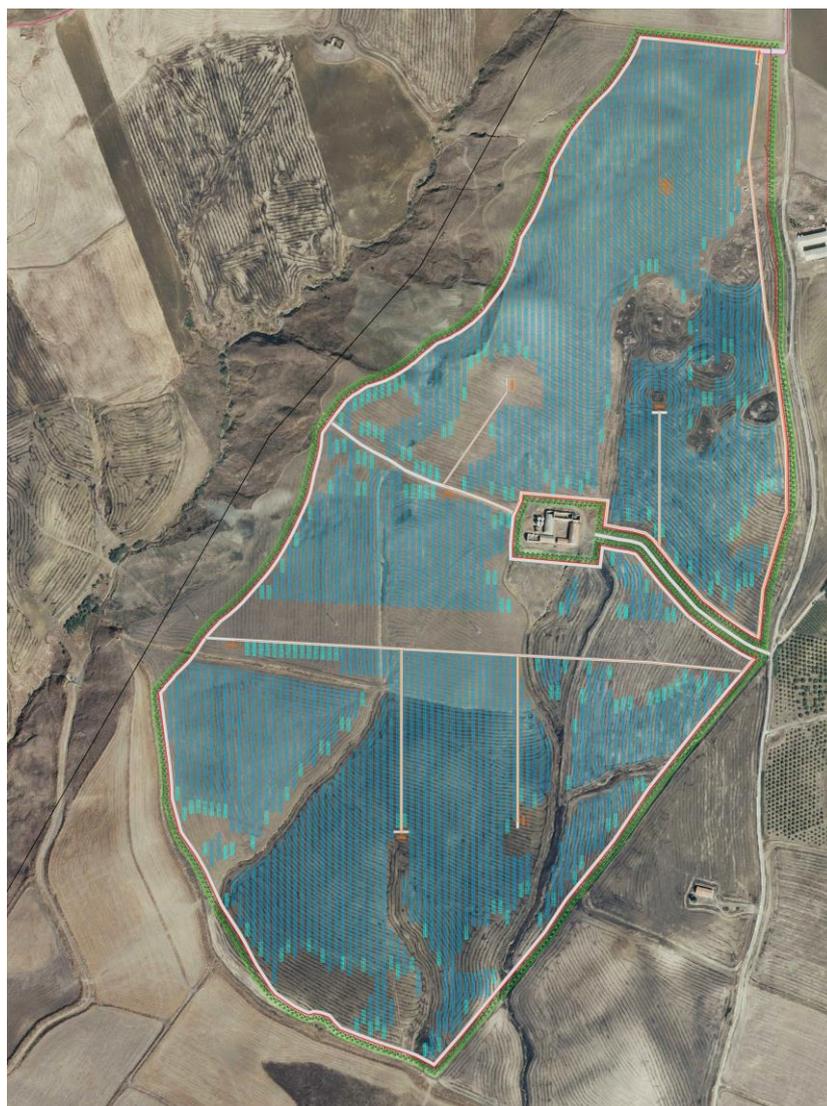


Figura 2. Inquadramento Campo Fotovoltaico su Ortofoto

4.2 Principali componenti progettuali

4.2.1 Modulo FV

I moduli fotovoltaici sono costituiti da celle solari semiconduttrici che convertono l'energia della luce solare incidente in elettricità tramite l'effetto fotovoltaico. Si tratta di una tipologia di cellula fotoelettrica, le cui caratteristiche elettriche, cioè corrente, tensione e resistenza, possono variare quando è esposta alla luce.

Nella seguente tabella si riportano le principali caratteristiche dei moduli FV ipotizzati nel layout di progetto:

<i>Brand / Modello</i>	Yangtze / YS700M-66 (o similare)	
<i>Potenza [Wp]</i>	700	
<i>Tensione Vmp @ 25°C [V]</i>	39,58	
<i>Tensione Voc @ 25°C [V]</i>	46,75	
<i>Corrente Imp [A]</i>	17,69	
<i>Corrente Isc [A]</i>	18,92	
<i>Coefficiente di Temperatura Voc [%/°C]</i>	-0,29	
<i>Coefficiente di Temperatura Pmax [%/°C]</i>	-0,35	
<i>Rendimento [%]</i>	22,3	
<i>Dimensione maggiore [mm]</i>	2400	
<i>Dimensione minore [mm]</i>	1303	
<i>Spessore [mm]</i>	35	
<i>Peso [kg]</i>	36	

Tabella 2. Dati tecnici Modulo FV

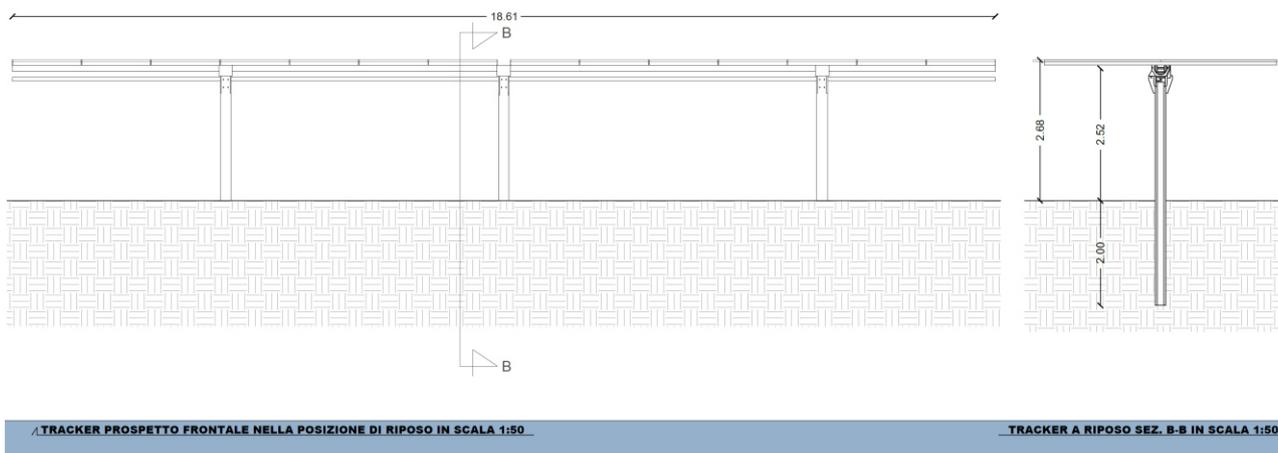
4.2.2 Tracker mono-assiale

I tracker (o inseguitori solari) ipotizzati garantiscono compatibilità totale con i moduli FV sopra indicati. Di seguito una tabella riepilogativa con le caratteristiche chiave e un disegno preliminare della struttura:

<i>Brand / Modello</i>	Soltigua / TRJ (o similare)	
<i>Tipologia</i>	2 Portrait (2P)	
<i>Tecnologia</i>	Mono-assiale con backtracking	
<i>Angolo di Rotazione</i>	$\pm 60^\circ$	
<i>Massima inclinazione terreno N-S</i>	15% (8° ca)	
<i>Numero di moduli per Tracker/Stringa</i>	2x28 o 2x14	
<i>Lunghezza Tracker [m]</i>	37,23 o 18,61	
<i>Larghezza [m]</i>	4,82	
<i>Altezza del fulcro dal suolo [m]</i>	2,52	
<i>Pitch [m]</i>	9,3	

Tabella 3. Tracker/Stringa

Di seguito è riportato il dettaglio del particolare costruttivo tracker e pannelli FV in pianta, prospetto e sezione:



TRACKER PROSPETTO FRONTALE NELLA POSIZIONE DI RIPOSO IN SCALA 1:50

TRACKER A RIPOSO SEZ. B-B IN SCALA 1:50

Figura 3. Tracker 2P in posizione di riposo - Vista Longitudinale e Sezione Trasversale

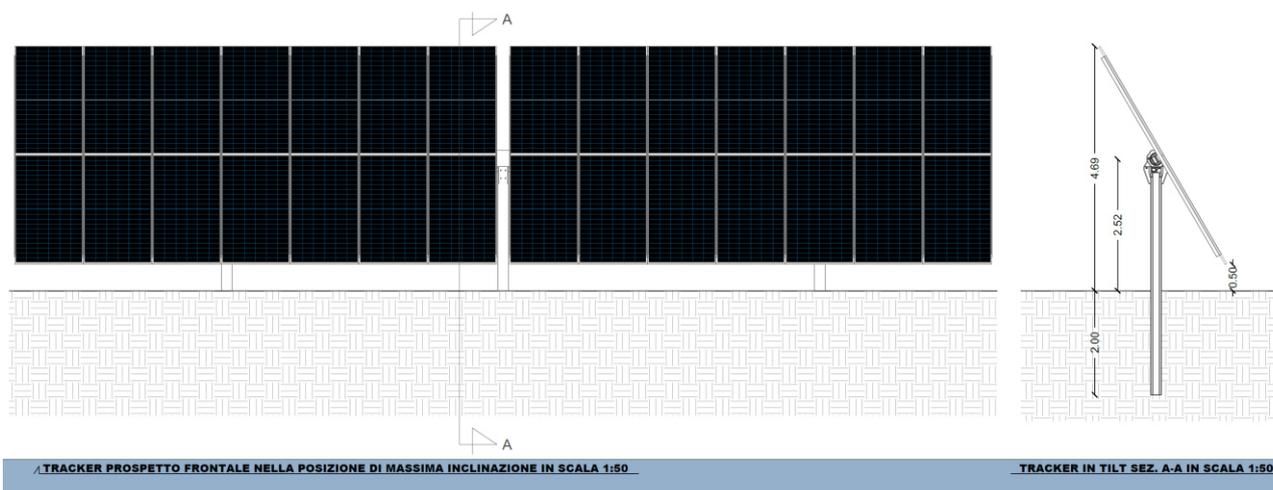


Figura 4. Tracker 2P in posizione di massima inclinazione - Vista Longitudinale e Sezione Trasversale

4.2.3 Quadro di Stringa

I cavi DC in uscita dai tracker verranno indirizzati ad appositi quadri di stringa: ogni quadro di stringa avrà a disposizione un numero di input limitato ove verranno collegati i cavi in uscita dalle varie stringhe.

Disponibile in modelli da 8 a 24 ingressi e con una tensione massima DC di 1500 V, è stato ipotizzato il quadro di stringa prodotto da INGETEAM, gli INGECON SUN 12B. I quadri della serie INGECON SUN sono inoltre caratterizzati dalla presenza all'interno di portafusibili in DC, fusibili in DC, scaricatori di sovratensione DC indotta da scariche atmosferiche e interruttore di manovra sezionatore sotto carico.

Nella tabella seguente si riportano le principali caratteristiche dei quadri di stringa ipotizzati:

<i>Brand / Modello</i>	INGETEAM / INGECON SUN StringBox 12B (o similare)	
<i>N° max di input FV</i>	12	
<i>Corrente di corto-circuito I_{sc} [A]</i>	13,98	
<i>Corrente di impiego I_{mp} [A]</i>	13,12	
<i>Corrente max di corto-circuito [A]</i>	167	
<i>Tensione max [V]</i>	1500	
<i>Fusibile</i>	Uno per polo	
<i>Scaricatore</i>	Tipo I e II	
<i>Sezionatore DC</i>	250 A, 2 poli	
<i>Peso [kg]</i>	40	
<i>Dimensioni (L x A x P) [mm]</i>	930 x 730 x 260	

Tabella 4. Quadri di stringa

4.2.4 Power Station

Ogni Power Station effettua una trasformazione continua/alternata in BT per mezzo degli inverter prima indicati e, successivamente, con l'ausilio di trasformatori BT/MT eleva la tensione a 30 kV.

Nelle tabelle seguenti si riportano le principali caratteristiche degli inverter e delle Power Station ipotizzate:

<i>Brand / Modello</i>	INGETEAM / 1600TL B615 (o similare)	INGETEAM / 1690TL B650 (o similare)	INGETEAM / 1800TL B690 (o similare)
<i>Potenza Nominale in Input da Stringa FV [kWp]</i>	1582	1672	1775
<i>Potenza Massima in Input da Stringa FV [kWp]</i>	2077	2196	2330
<i>V_{mpp min} [V]</i>	873	921	977
<i>V_{mpp max} [V]</i>	1300		
<i>Tensione Massima [V]</i>	1500		
<i>Massima corrente [A]</i>	1870		
<i>Potenza di uscita [kVA] @ 30°C</i>	1598	1689	1793
<i>Tensione di uscita [V]</i>	650 (Sistema IT)	650 (Sistema IT)	690 (Sistema IT)



Tabella 5. Inverter interni alle Power Station (PS)

<i>Brand / Modello</i>	INGECON / SUN FSK (o similare)
<i>Tipo</i>	7200 B SERIES
<i>N° Inverter</i>	1
<i>Max Potenza Output [kVA] @30°C</i>	7172
<i>Tensione Trafo lato BT [V]</i>	690
<i>Tensione Trafo lato MT [V]</i>	30.000

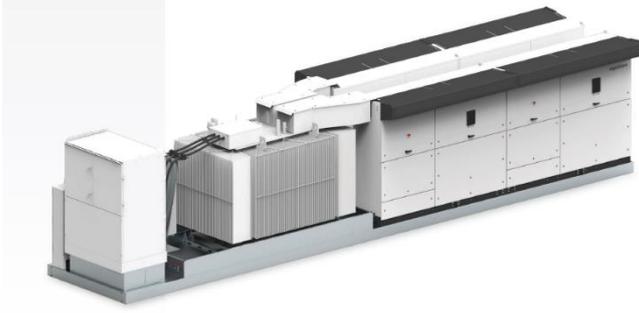


Tabella 6. Power Station

Le Power Station saranno connesse tra loro in “entra-esce” in modo che sia possibile collegare tra loro diversi sottocampi dislocati geograficamente ed ottimizzare il cablaggio ed il passaggio cavi.

5 CRITERI DI DIMENSIONAMENTO

I criteri presi in considerazione per il dimensionamento sono i seguenti:

- Calcolo delle correnti di impiego
- Dimensionamento dei cavi
- Integrale di Joule
- Cadute di tensione
- Criterio termico ed elettrico

Si riporta di seguito una tabella riepilogativa di tutti i dati ed i risultati di calcolo elettrico ottenuti:

	SottocampoA	SottocampoB	SottocampoC	SottocampoD	SottocampoE	SottocampoF	SottocampoG
Tipologia di Pannelli	YANGTZE 700						
N° Pannelli x Stringa	28						
Tipologia impianto	Agro FV						
Totale Tracker da 28	1187						
Totale Tracker da 14	210						
Totale Stringhe	2584						
Pannelli per sottocampo	10248	10248	9688	9464	10920	10920	10864
Totale Pannelli	72352						
Totale Quadri di	219						
Potenza [kWp]	7173,6	7173,6	6781,6	6624,8	7644	7644	7604,8
Potenza Totale [MWp]	50,6464						
Numero Inverter	4	4	4	4	4	4	4
Potenza Nominale [kVAac]	7172	7172	6756	6392	7172	7172	7172
Sovraccaricabilità inverter [%]	100%	100%	100%	104%	107%	107%	106%
Potenza Nominale Totale [MVAac]	49,0080						
N° Power Station (PS)	7						

Tabella 7. Riepilogo Dimensionamento Elettrico Campo Fotovoltaico

6 CONNESSIONI ELETTRICHE

Per la connessione dei moduli FV si necessita di cavi in DC. In particolare, si andranno ad utilizzare due tipologie di cavi in condizioni di posa differenti:

- *H1Z2Z2-K*: Cavo solare “in aria” per la connessione fisica fra i moduli FV e il Quadro di Stringa dedicato;
- *ARG16R16*: Cavo BT (DC) “interrato” per la connessione fra il Quadro di Stringa e gli Inverter Centralizzati disposti internamente alle Power Station.

6.1 Cavo Solare H1Z2Z2-K

Si riporta di seguito un’immagine caratteristica del cavo in esame:



Figura 5. Cavo Solare H1Z2Z2-K

Questi cavi unipolari flessibili stagnati si adoperano per le interconnessioni di elementi di impianti fotovoltaici in quanto, oltre ad una tensione massima di 1800 V in continua, hanno un’elevata adattabilità alle condizioni ambientali esterne. Infatti, sono adatti sia per l’installazione fissa all’esterno che all’interno, entro tubazioni in vista o incassate o in sistemi chiusi similari; sono adatti sia per la posa direttamente interrata che entro tubo interrato e possono essere utilizzati con apparecchiature di classe II. Sono caratterizzati da proprietà meccaniche ottimali in un intervallo di temperatura di esercizio da - 40 a + 90 °C, elevata resistenza all’abrasione, alla lacerazione, ai raggi UV, all’ozono, all’acqua, non propagazione della fiamma, basso sviluppo di fumi, assenza di alogeni, resistenza agli agenti atmosferici che ne permette una durata almeno pari alla vita utile dell’impianto fotovoltaico. In particolare, questi cavi sono di Rame stagnato ricotto classe 5; prevedono un isolante e guaina in mescola LSOH (Low Smoke Zero Halogen) di gomma reticolata, non propagante la fiamma, qualità Z2; con anime di colore nero e guaina di colore blu, rosso, nero.

I cavi tra i moduli a formare le stringhe saranno opportunamente fissati alla struttura tramite fascette, e comunque canalizzati in modo da essere a vista. Discorso analogo vale per il collegamento tra tali cavi e i quadri di stringa.

6.2 Cavo BT (DC) ARG16R16

Si riporta di seguito un’immagine caratteristica del cavo in esame:



Figura 6. Cavo BT ARG16R16 0,6/1 kV

Tali cavi sono stati impiegati poiché adatti per il trasporto di energia nell’industria, nei cantieri, nell’edilizia residenziale; inoltre ammettono la posa interrata anche se non protetta. Essi sono impiegati per installazione fissa all’interno e all’esterno, su murature e strutture metalliche, su passerelle, tubazioni, canalette e sistemi similari.

Date le proprietà di limitare lo sviluppo del fuoco e l’emissione di calore, il cavo è adatto per l’alimentazione di energia elettrica nelle costruzioni ed altre opere di ingegneria civile. Tali cavi hanno conduttore in alluminio in corda rotonda compatta, classe 2; isolamento in gomma, qualità G16; inoltre i conduttori isolati vengono cordati insieme, la guaina interna è in materiale termoplastico mentre quella esterna è in PVC (Polivinilcloruro), qualità R16.

6.3 Cavo MT ARE4H5E – 18/30 kV

Per il collegamento elettrico a 30 kV, si prevede l'utilizzo di cavi unipolari di tipo ARE4H5E-18/30 kV, aventi le seguenti caratteristiche:

- Anima realizzata con conduttore a corda rotonda compatta di alluminio;
- Semiconduttore interno a mescola estrusa;
- Isolante in mescola di polietilene reticolato per temperature a 85°C XLPE;
- Semiconduttore esterno a mescola estrusa;
- Rivestimento protettivo realizzato con nastro semiconduttore igroespandente;
- Schermo a nastro in alluminio avvolto a cilindro longitudinale ($R_{\max} = 3 \Omega/\text{km}$)
- Guaina in polietilene, colore rosso.

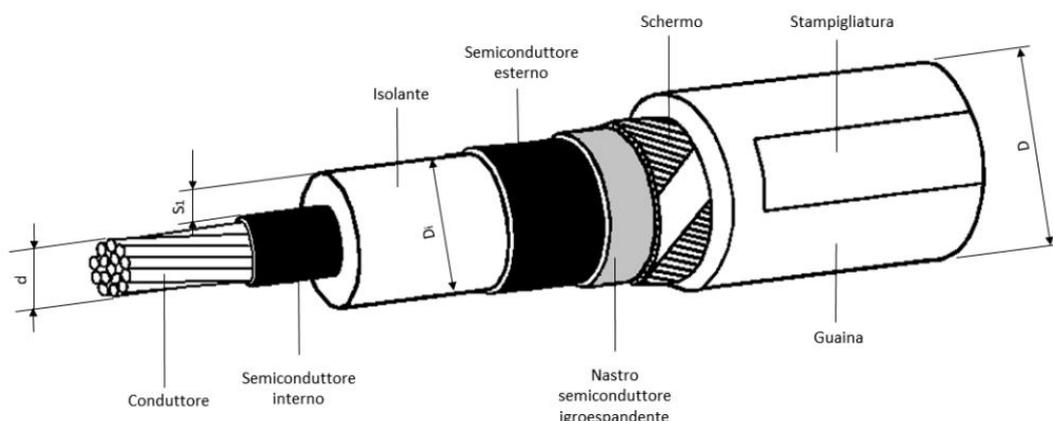


Figura 7. Immagine indicativa del tipo di Cavo

Il cavidotto, per le condizioni di posa, rispetta le indicazioni riportate nella norma CEI 11-17. Sarà costituito da cavi unipolari direttamente interrati (modalità di posa tipo M), ad eccezione degli attraversamenti di opere stradali e/o fluviali richieste dagli enti concessionari, per i quali sarà utilizzata una tipologia di posa che prevede i cavi unipolari in tubo interrato (modalità di posa N). La posa verrà eseguita ad una profondità di 1,20 m.

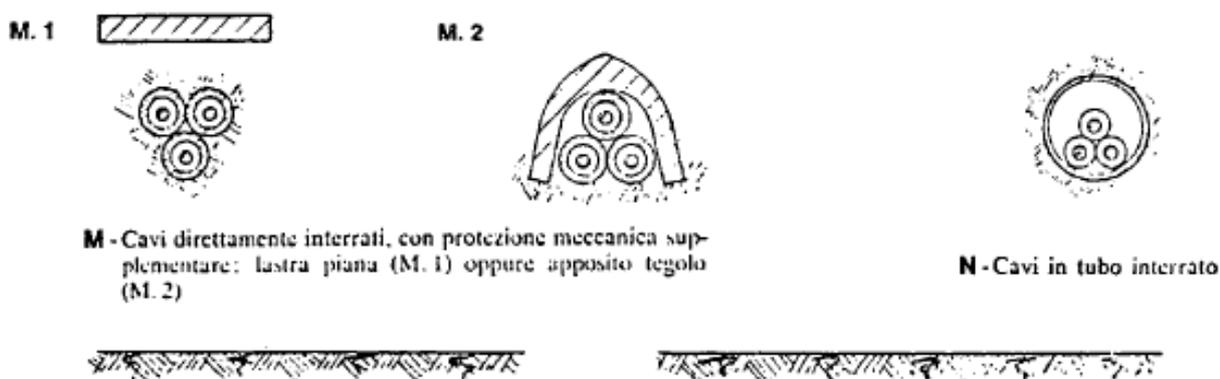


Figura 8. Modalità di Posa (CEI 11-17)

Il tracciato del cavidotto, che segue la viabilità prima definita, è realizzato nel seguente modo:

- Scavo a sezione ristretta obbligata (trincea) con dimensioni variabili;
- Letto di sabbia di circa 10 cm, per la posa delle linee MT avvolte ad elica;
- Rinfilanco e copertura dei cavi MT con sabbia per almeno 10 cm;
- Corda nuda in rame (o in alluminio) per la protezione di terra (avente, come previsto da norma CEI EN 61936-1, una sezione maggiore o uguale di 16 mm^2 per il rame e 35 mm^2 nel caso di alluminio), e tubazioni PVC per il contenimento dei cavi di segnale e della fibra ottica, posati direttamente sulla sabbia, all'interno dello scavo;
- Riempimento per almeno 20 cm con sabbia;
- Inserimento per tutta la lunghezza dello scavo, e in corrispondenza dei cavi, delle tegole protettive in plastica rossa per la protezione e individuazione del cavo stesso;
- Nastro in PVC di segnalazione;
- Rinterro con materiale proveniente dallo scavo o con materiale inerte.

7 DIMENSIONAMENTO CAVI ELETTRICI

7.1 Cavo DC: Moduli fotovoltaici - Quadro di stringa

Per la scelta dei cavi della parte in corrente continua, dalla “CEI 82-25: Guida alla realizzazione di sistemi di generazione fotovoltaica collegati alle reti elettriche di Media e Bassa Tensione” è possibile individuare le condizioni da rispettare per il dimensionamento a “regola d’arte” dei cavi in DC:

1. La caduta di tensione massima deve rientrare nel 2% (anche se è buona regola indicare come soglia l’1%);

2. Il dimensionamento dei cavi deve essere fatto considerando una corrente che è $1,25 \times I_{sc}$ (Corrente di cortocircuito del modulo FV) in qualsiasi punto¹ in maniera tale da omettere la protezione contro i sovraccarichi.

Inoltre, va rispettata la seguente condizione tecnica in merito alla tensione cavo/stringa:

$$1,5 U_o \geq 1,2 U_{oc}$$

dove U_o : tensione di fase verso terra (coincidente alla tensione nominale per sistemi isolati da terra) e U_{oc} è la tensione a vuoto della stringa in condizioni di prova standard². In particolare, in funzione alla scelta del cavo e alla sua tensione fase-terra, la maggiorazione del 50% deve essere superiore ad $1,2 U_{oc}$.

Si riportano i dati significativi per il dimensionamento del cavo in DC di connessione tra le stringhe e il Quadro di Stringa:

<i>Modello Modulo FV</i>	YS700M-66 (o similare)
<i>Corrente I_{sc} @ STC [A]</i>	18,92
<i>Tensione V_{oc} @ STC [V]</i>	46,75
<i>Moduli per Stringa</i>	28
<i>Temperatura ambientale [°C]</i>	Fino a 60°C
<i>Tipo di Posa</i>	Due cavi a contatto su superficie
<i>Massima Caduta di Tensione</i>	2% (30 V)

Tabella 8. Dati per Dimensionamento cavi DC per collegamento moduli FV

Considerando che il cavo scelto abbia una tensione massima U_o pari a 1,8 kVcc in quanto è stato scelto il seguente cavo:

¹ CEI 64-8, art 712.433

² $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$, Irraggiamento = 1000 W/m²

<p>CPR (UE) n° 305/11 D_{ca} - s1, d2, a1</p> <p>EN 50618 CEI EN 60332-1-2 CEI EN 50525 CEI EN 50289-4-17 A CEI EN 50396 2014/35/UE 2011/65/CE CA01.00546</p>	<p>Regolamento Prodotti da Costruzione/Construction Products Regulation Classe conforme norme EN 50575:2014 + A1:2016 e EN 13501-6:2014 Class according to standards EN 50575:2014 + A1:2016 and EN 13501-6:2014</p> <p>Costruzione e requisiti/Construction and specifications Propagazione fiamma/Flame propagation Emissione gas/Gas emission Resistenza raggi UV/UV resistance test Resistenza ozono/Ozone resistance Direttiva Bassa Tensione/Low Voltage Directive Direttiva RoHS/RoHS Directive Certificato IMQ/IMQ Certificate</p>	<p>DoP n° 1081/19</p> 
<p>DESCRIZIONE</p> <p>Cavo unipolare flessibile stagnato per collegamenti di impianti fotovoltaici. Isolamento e guaina realizzati con mescola elastomerica senza alogeni non propagante la fiamma.</p> <p>Conduttore Corda flessibile di rame stagnato, classe 5</p> <p>Isolante Mescola LSOH di gomma reticolata speciale di qualità conforme alla norma EN 50618 LSOH = Low Smoke Zero Halogen</p> <p>Guaina esterna Mescola LSOH di gomma reticolata speciale di qualità conforme alla norma EN 50618</p> <p>Colore anime Nero</p> <p>Colore guaina Blu, rosso, nero</p> <p>Marcatura a inchiostro BALDASSARI CAVI IEMMEQU <HAR> H1Z2Z2-K 1/1 kV (sez) (anno) (m) (tracciabilità)</p>	<p>DESCRIPTION</p> <p>Flexible single-core cable for connection in photovoltaic installations. Insulation and sheath made of elastomeric compound, halogen free and flame retardant.</p> <p>Conductor Tinned copper flexible wire, class 5</p> <p>Insulation Special LSOH cross-linked rubber compound according to EN 50618 quality LSOH = Low Smoke Zero Halogen</p> <p>Outer sheath Special LSOH cross-linked rubber compound according to EN 50618 quality</p> <p>Cores colour Black</p> <p>Sheath colour Blue, red or black</p> <p>Inkjet marking BALDASSARI CAVI IEMMEQU <HAR> H1Z2Z2-K 1/1 kV (section) (year) (m) (traceability)</p>	
<p>CARATTERISTICHE TECNICHE</p> <p>Tensione massima: 1800 V c.c. - 1200 V c.a.</p> <p>Temperatura massima di esercizio: 90°C</p> <p>Temperatura minima di esercizio: -40°C</p> <p>Temperatura minima di posa: -40°C</p> <p>Temperatura massima di corto circuito: 250°C</p> <p>Sforzo massimo di trazione: 15 N/mm²</p> <p>Raggio minimo di curvatura: 4 volte il diametro esterno massimo</p> <p>Condizioni di impiego Per l'interconnessione di elementi di impianti fotovoltaici. Adatti per l'installazione fissa all'esterno e all'interno, entro tubazioni in vista o incassate o in sistemi chiusi similari. Adatti per la posa direttamente interrata o entro tubo interrato e per essere utilizzati con apparecchiature di classe II.</p>	<p>TECHNICAL CHARACTERISTICS</p> <p>Maximum voltage U₀/U: 1800 V d.c. - 1200 V a.c.</p> <p>Maximum operating temperature: 90°C</p> <p>Minimum operating temperature: -40°C</p> <p>Minimum installation temperature: -40°C</p> <p>Maximum short circuit temperature: 250°C</p> <p>Maximum tensile stress: 15 N/mm²</p> <p>Minimum bending radius: 4 x maximum external diameter</p> <p>Use and installation For interconnection of photovoltaic elements. Suitable for fixed installation indoor and outdoor, in pipes exposed or embedded or in similar closed systems. Suitable for laying directly underground or in pipe underground and to be used for class II equipment.</p>	

Figura 9. Datasheet cavo H1Z2Z2-K

e che la tensione della stringa a vuoto U_{oc} è pari al numero di pannelli in serie per la tensione a vuoto U_{oc} del singolo pannello risulta immediatamente idoneo in termini di tensione in quanto:

$$1,5 \cdot 1,8\text{kV} = 2700 \text{ V} \geq 1,2 \cdot 46,75 \text{ V} \cdot 28 = 1570,8 \text{ V}$$

Inoltre, per il dimensionamento dei cavi in DC per la connessione tra i moduli FV e i Quadri di Stringa, si è fatto riferimento alla normativa “CEI EN 50618 – Cavi Elettrici per Impianti Fotovoltaici”. In particolare, oltre ad individuare la portata I_0 del cavo H1Z2Z2-K, nota la condizione di posa, individua due fattori correttivi da applicare affinché si verifichi:

$$I_z \geq K_T \cdot K_N \cdot I_0 \geq I_b = 1,25 \cdot I_{sc}$$

dove:

- K_T è il fattore di conversione per corrente nominale per diverse temperature ambientali;
- K_N è il fattore di correzione per installazioni di gruppo³.

In queste condizioni, i fattori correttivi da applicare sono:

- $K_T = 1$;
- $K_N = 0,45$.

Ipotizzando una distanza media di un tracker dal Quadro di stringa dedicato sia di 80 m. Si riportano di seguito i valori scelti per il cavo in esame:

Sezione [mm^2]	6
Corrente d'impiego [A]	23,65
Portata I_0 [A]	57
Resistenza [Ω/km] @ 90°C	3,85
Corrente effettiva I_z [A]	25,65

Tabella 9. Dati cavo H1Z2Z2-K scelto

È facile verificare che, con una sovraccaricabilità del 125%, è verificata la condizione precedente:

$$I_z = 25,65 A \geq I_b = 1,25 \cdot 18,92 A = 23,65 A$$

Supponendo inoltre, una distanza media della stringa dai quadri installati sui pali dei tracker, è garantito anche il rispetto della massima caduta di tensione ammissibile:

$$\Delta V = 2 \cdot r \cdot l \cdot I_b = 2 \cdot 3,85 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,08 km \cdot 23,65 A = 14,57 V < 30 V$$

Possiamo concludere che la sezione scelta è sufficiente (a maggior ragione essendoci posti in condizioni cautelative e nell'ipotesi di pieno carico) per garantire la connessione dei moduli FV al Quadro di Stringa.

7.2 Cavo DC: Quadro di Stringa – Inverter Centralizzati

Per il cavo di collegamento tra il Quadro di Stringa e gli Inverter Centralizzati interni alle Power Station si adopera il cavo ARG16R16, utile per il trasporto di energia in DC. Per questa tipologia di cavo, oltre alla modalità di posa che definisce la portata I_0 , si individuano quattro fattori correttivi⁴ da applicare affinché si verifichi:

³ HD 60364-5-32:2011, Tabella B.52.17

⁴ CEI 64-8: Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua

$$I_z \geq K_T \cdot K_N \cdot K_P \cdot K_R \cdot I_0 \geq I_b = 1,25 \times N \cdot I_{sc}$$

Dove:

- N rappresenta il numero di stringhe che arrivano nei quadri di stringa;
- K_T è il coefficiente di correzione per posa interrata e temperature ambientali diverse dai 20°C;
- K_N è il coefficiente di correzione per gruppi di più circuiti;
- K_P è il coefficiente di correzione per valori di profondità di posa diversa da 0,8 m;
- K_R è il coefficiente di correzione per valori di resistività termica diversi da 1,5 K*m/W.

Si riportano i dati significativi per il dimensionamento del cavo in DC per la connessione tra i Quadri di Stringa e gli Inverter centralizzati:

<i>N° Input per QdS</i>	12
<i>Corrente QdS I_b [A]</i>	283,80
<i>Tipo di Posa</i>	Interrata in Tubo
<i>Temperatura di Posa [°C]</i>	35
<i>N° Conduttori nello scavo</i>	3
<i>Distanza tra circuiti [mm]</i>	250
<i>Profondità di Posa [m]</i>	0,8
<i>Resistività Termica [K m/W]</i>	1,5
<i>Massima Caduta di Tensione</i>	2% (30 V)

Tabella 10. Dati per Dimensionamento cavi BT (DC) per collegamento Quadri di Stringa

In queste condizioni, i fattori correttivi da applicare sono:

- $K_T = 0,89$;
- $K_N = 0,8$;
- $K_P = 1$;
- $K_R = 1$.

Analogamente a quanto detto in precedenza, ipotizzando che la distanza media di un QdS dalla PS dove è inserito l'inverter sia di 100 m circa. Si riportano di seguito i valori scelti per il cavo in esame:

<i>Sezione Cavo [mm²]</i>	400
<i>Cavi in parallelo</i>	1
<i>Resistenza [Ohm/km] @T posa[°C]</i>	0,12
<i>I_z [A]</i>	297
<i>Corrente d'Impiego $I_b \times QdS$ [A]</i>	283,8

Tabella 11. Dati cavo ARG16R16 scelto

È facile verificare che, con una sovraccaricabilità del 125%, è verificata la condizione precedente:

$$I_z = 297 \geq I_b = 1,25 \cdot 12 \cdot 23,65 = 283,8 \text{ A}$$

Inoltre, definita la distanza media del QdS dalla Power Station, è garantito anche il rispetto della massima caduta di tensione ammissibile:

$$\Delta V = 2 \cdot r \cdot l \cdot I_b = 2 \cdot 0,12 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 0,1 \text{ km} \cdot 283,80 = 6,82 \text{ V} < 30 \text{ V}$$

Possiamo concludere che la sezione scelta è sufficiente (a maggior ragione essendoci posti in condizioni cautelative e nell'ipotesi di pieno carico) per garantire la connessione dei QdS agli inverter delle PS.

7.3 Cavo MT: Inverter – Cabina di raccolta – Sottostazione utente

Per il dimensionamento dei cavi a 30 kV sono stati applicati il criterio termico (come indicato dalla CEI UNEL 35027) ed il criterio elettrico come ulteriore verifica delle sezioni scelte. Per il criterio termico è necessario individuare innanzitutto la corrente d'impiego I_b per la singola tratta, in modo da garantire che la portata del cavo I_0 (opportunamente corretta) sia sempre maggiore della corrente d'impiego prevista.

$$I_z = K_{TT} \cdot K_d \cdot K_p \cdot K_r \cdot I_0 > I_b$$

Dove:

- K_{TT} è il coefficiente di correzione per posa interrata e temperature ambientali diverse dai 20 °C;
- K_d è il coefficiente di correzione per cavi tripolari (nel nostro caso assumeremo 1 perché adoperiamo cavi unipolari);
- K_p è il coefficiente di correzione per valori di profondità di posa diversa da 0,8 m (cavi direttamente interrati);
- K_r è il coefficiente di correzione per valori di resistività termica diversi da 1,5 K m/W (cavi direttamente interrati)

Per il criterio elettrico è necessario verificare che la massima caduta di tensione sul cavidotto, nelle condizioni di funzionamento ordinario e particolari previsti (per es. avviamento motori), sia entro valori accettabili in relazione al servizio. Indicazioni circa i valori ammissibili per la caduta di

tensione possono essere ricavati dalle norme relative agli apparecchi utilizzatori connessi e dalle norme relative agli impianti, ove applicabili. Nel caso specifico si assume:

$$\Delta V = K_L \cdot (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \leq 4\%$$

Dove:

- K_L , coefficiente di linea: 2 per linea monofase e $\sqrt{3}$ per linea trifase;
- R, resistenza del cavo;
- X, reattanza del cavo;
- I, corrente di impiego (I_b);
- $\cos \varphi$ ($\sin \varphi$), fattore di potenza.

Si riportano i dati di progetto per il dimensionamento delle varie tratte del cavidotto interno e del cavidotto esterno:

Tratta	A-CR	B-D	D-C	C-CR	E-F	F-G	G-CR	Cavidotto
Potenza Tratta [kW]	7172,00	7172,00	13564,00	20320,00	7172,00	14344,00	21516,00	49008,00
Corrente d'Impiego Ib[A]	145,29	145,29	274,78	411,64	145,29	290,58	435,87	992,80
Lunghezza Linea [km]	0,40	0,22	0,62	1,30	0,55	0,72	1,55	17,00
Tensione Linea [kV]	30,00							
$\Delta V\%$	4,00							
$\cos \phi$	0,95							
Tipo di posa	Interrato							
Tipo di linea	Trifase							
Temperatura Amb. [°C]	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Temperatura di Posa [°C]	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	30,00
Kt	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93
Profondità di Posa [m]	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Kp	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Numero Terne nello Scavo	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	3,00
Kn	1,00	1,00	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,78
Distanza Terne [mm]	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00
ρ [K m/W]	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Kr	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85

Tabella 12. Dati di Progetto per Dimensionamento Elettrico Cavi MT

Si riportano di seguito le scelte progettuali delle sezioni dei cavi ARE4H5E – 18/30 kV:

Tratta	A-CR	B-D	D-C	C-CR	E-F	F-G	G-CR	Cavidotto
Sezione Cavo [mm ²]	70,00	70,00	300,00	630,00	95,00	300,00	630,00	630,00
Cavi in Parallelo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	3,00
Portata cavo I0[A]	213,00	213,00	480,00	709,00	255,00	480,00	709,00	709,00
Portata effettiva Iz[A]	177,43	177,43	343,86	507,91	182,68	343,86	507,91	1285,26

Tabella 13. Dimensionamento Cavi MT

Si riportano nella tabella successiva le caratteristiche meccaniche ed elettriche in funzione delle sezioni scelte:

Sezione [mm ²]	Diametro Conduttore d [mm]	Diametro sull'isolante Di [mm]	Diametro esterno nominale D [mm]	Massa indicativa del cavo [kg/km]	Resistenza a trifoglio @ 90 °C [Ω/km]	Reattanza a trifoglio @ 50 Hz [Ω/km]
70	9,70	25,6	34,0	870	0,580	0,140
95	11,4	26,5	35,0	950	0,416	0,130
300	20,8	34,7	44,0	1740	0,136	0,110
630	30,5	45,6	56,0	3130	0,074	0,099

Tabella 14. Caratteristiche meccaniche ed elettriche del Cavo MT in funzione della Sezione scelta

Di seguito una tabella riepilogativa con le perdite ricavate a partire dalle caratteristiche del cavo e dalla configurazione d'impianto:

Tratta	A- CR	B-D	D-C	C-CR	E-F	F-G	G-CR	Cavidotto
Caduta di Tensione [V]	48,88	26,88	40,71	80,83	49,48	49,99	102,05	161,36
c.d.t [%]	0,16	0,09	0,14	0,27	0,16	0,17	0,34	0,54
Potenza dissipata [kW]	11,78	6,48	15,32	39,16	11,62	19,89	52,35	110,33
Potenza dissipata [%]	0,16	0,09	0,11	0,19	0,16	0,14	0,24	0,23

Tabella 15. Perdite d'impianto in MT

Come si può evincere dalla tabella, la c.d.t. totale dell'impianto e la potenza dissipata rientrano in un valore nettamente inferiore al 2%.