



**PROGETTO DEFINITIVO DELL'IMPIANTO AGRIVOLTAICO DELLA POTENZA DI PICCO DI 360MW CON SISTEMA DI ACCUMULO DI CAPACITA' PARI A 82,5MWH E RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RETE RTN, DA REALIZZARSI NEL COMUNE DI SASSARI NELLE FRAZIONI DI "PALMADULA, LA CORTE, CANAGLIA, LI PIANI, SAN GIORGIO, SCALA ERRE"**

## PROGETTO DEFINITIVO

COMMITTENTE:

**PALMADULA  
SOLAR S.R.L.** 

PROGETTISTA:



TITOLO ELABORATO:

**RELAZIONE CARBOON FOOTPRINT**

ELABORATO n°:  
BI028F-D-PAL-AMB-02-r00

NOME FILE:

SCALA: ----

DATA: AGOSTO 2023

REVISIONE	N.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
	00		Agosto 2023	Prima Emissione	C.Tua	M. Sandri
01						
02						
03						
04						

A TERMINE DI LEGGE CI RISERVIAMO LA PROPRIETA' DI QUESTO ELABORATO CON DIVIETODI RIPRODURLO RENDENDOLO NOTO A TERZI ANCHEPARZIALMENTE SENZA NOSTRA AUTORIZZAZIONE



**POLITECNICO DI MILANO**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E  
AMBIENTALE**

**Sezione Ambientale**



Assessment on WASTE  
and RESOURCES

**Gruppo di ricerca AWARE - *Assessment on WASTE  
and RESOURCES***

## **Analisi di Carbon Footprint relative al ciclo di vita del Parco agro fotovoltaico di Palmadula**

**A cura di:**

*Ing. Lucia Rigamonti (Responsabile scientifico),  
Dott.ssa Camilla Tua e Ing. Gaia Brussa*

*Agosto 2023*

## Sommario

1. Obiettivi dell'analisi e campo di applicazione.....	4
1.1. Applicazione dello studio e principali obiettivi.....	4
1.2. Definizione dell'unità funzionale .....	4
1.3. Confini del sistema .....	5
1.4. Categorie di impatto analizzate .....	5
1.5. Qualità dei dati utilizzati.....	6
2. Analisi di inventario .....	6
2.1. Ciclo di vita del modulo fotovoltaico (produzione, approvvigionamento e fine vita).....	6
2.2. Ciclo di vita dell'inverter (produzione, approvvigionamento e fine vita) .....	8
2.3. Ciclo di vita dei sistemi a inseguimento (produzione, approvvigionamento e fine vita) .....	9
2.4. Ciclo di vita dei cavi (produzione, approvvigionamento e fine vita) .....	9
2.5. Cantierizzazione .....	12
2.6. Coltivazione delle piante previste.....	13
3. Risultati e discussione .....	15
4. Conclusioni.....	17
Bibliografia.....	18
Appendice A - elenco dei principali dataset adottati per singola fase .....	20
Appendice B - dettagli di modellizzazione del modello di inverter .....	22
Appendice C - dettagli sulla fase di cantierizzazione .....	22

## 1. Obiettivi dell'analisi e campo di applicazione

### 1.1. Applicazione dello studio e principali obiettivi

L'applicazione del presente studio è valutare l'impatto sul cambiamento climatico dell'impianto agrivoltaico "Palmadula" il cui blocco principale si concentra nel territorio del Comune di Palmadula (Sassari, SS), secondo quanto descritto nel progetto definitivo eseguito da Technical S.p.A. su incarico di PALMADULA Solar S.r.l (società di scopo interamente controllata da AGE Srl).

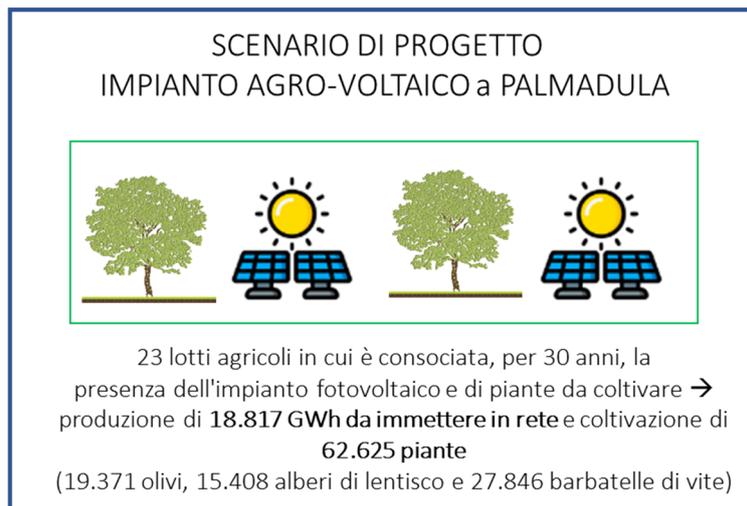
Lo studio è stato svolto applicando la metodologia dell'analisi del ciclo di vita (*Life Cycle Assessment, LCA*) prioritariamente con i seguenti obiettivi:

- valutare l'impatto sul cambiamento climatico del nuovo impianto agrivoltaico e comprendere quali siano le fasi più impattanti all'interno del ciclo di vita, per apportare eventualmente dei miglioramenti in un'ottica di sostenibilità ambientale, già in fase di definizione del layout;
- quantificare, tramite un indice di *payback*, l'effettivo beneficio sul cambiamento climatico associato alla produzione di energia elettrica dall'impianto fotovoltaico rispetto a un sistema tradizionale di produzione da fonte fossile (gas naturale).

L'impianto in questione prevede la produzione di energia elettrica da fonte solare per 30 anni tramite 523.180 moduli FotoVoltaici (FV) da 685 W<sub>p</sub> installati in 23 sottocampi in cui è prevista contestualmente la coltivazione di 19.371 alberi di olivo, 15.408 alberi di lentisco e 27.846 barbatelle di vite.

### 1.2. Definizione dell'unità funzionale

L'impianto agrivoltaico in questione svolge due funzioni principali (Figura 1) rappresentate dalla coltivazione di tre tipologie di piante (produzione di olive, uva e drupe di lentisco in campo) e dalla produzione di energia elettrica da fonte solare per una durata tecnica dell'impianto di 30 anni. Conseguentemente l'Unità Funzionale (UF) adottata per lo studio è: *"la produzione di circa 18.817 GWh di energia elettrica da immettere in rete e la coltivazione di 62.625 piante (19.371 olivi, 15.408 alberi di lentisco e 27.846 barbatelle di vite) in un arco temporale di 30 anni"*.



**Figura 1.** Scenario analizzato nella presente analisi LCA per l'impianto agrivoltaico di Palmadula Solar Srl.

Il valore di energia elettrica definito nell'unità funzionale è stato calcolato a partire dalla produzione di energia elettrica netta stimata per il primo anno di funzionamento dell'impianto (685,56 GWh/anno escluse le perdite di sistema e gli autoconsumi) e dal tasso di degradazione annuale ( $\text{deg}=0,4\%$ ) riportato nella scheda tecnica del modulo FV in accordo con la seguente formula (Trina Solar & Technology, 2020):

$$\text{EN. EL}_{.30 \text{ ANNI}} = \text{EN. EL}_{.ANNO1} * (1 + \sum_{N=1}^{29} (1 - \text{deg})^N)$$

Il numero complessivo di piante è stato fornito, invece, dalla relazione agronomica di progetto.

### 1.3. Confini del sistema

Per quanto riguarda i confini del sistema, nello studio sono state prese in considerazione le seguenti fasi:

- produzione delle principali componenti dell'impianto fotovoltaico ossia: moduli fotovoltaici, inverter, sistemi a inseguimento (anche detti *tracker*) e cavi per correnti continue, bassa tensione, media tensione e alta tensione. L'impianto prevede anche l'installazione di altri elementi quali cabine secondarie (anche dette *power units*), cabine di testa e l'impianto di accumulo, ma la loro produzione (inclusa quella dei componenti al loro interno) non è stata modellizzata a causa della mancanza di dataset sufficientemente rappresentativi;
- approvvigionamento dei singoli componenti dell'impianto fotovoltaico ossia trasporto dal luogo di produzione, generalmente situato all'estero, al sito di installazione (Comune di Palmadula);
- fase di cantierizzazione per la realizzazione dell'impianto fotovoltaico con inclusione delle principali operazioni previste: sfalcio della vegetazione esistente e allestimento dell'area di cantiere, realizzazione della viabilità interna e delle opere di recinzione, operazioni di scavo e sbancamento, posa dei cavi, installazione dei tracker, montaggio dei moduli FV, installazione di inverter e relativo collegamento, realizzazione delle platee di fondazione e installazione delle cabine e dell'impianto di accumulo, gestione dei rifiuti da cantiere (terre e rocce da scavo non recuperate in sito);
- fase di gestione delle piante messe a dimora (piantagione, fertilizzazione, operazioni colturali e assorbimento di anidride carbonica da parte della biomassa);
- dismissione dell'impianto e fine vita dei principali componenti (moduli, inverter, inseguitori e cavi). In relazione al fine vita, è stato preso come riferimento l'approccio modellistico del Sistema Internazionale *Environmental Product Declaration (EPD®)*, basato sull'approccio "chi inquina paga" e descritto nelle relative *General Programme Instructions*, versione 4.0 (The International EPD® System, 2021). Coerentemente con tale approccio, l'analisi del fine vita è stata impostata come segue:
  - se un elemento dell'impianto FV a fine vita è destinato a riciclo, al ciclo di vita dell'impianto fotovoltaico si associano solo gli impatti relativi al trasferimento dell'elemento al primo impianto di trattamento e a tale trattamento di prima selezione;
  - se un elemento dell'impianto FV è destinato a un processo di incenerimento, si conteggiano nella filiera i carichi ambientali del trasporto all'impianto e del successivo processo di combustione, escludendo tuttavia i carichi e i benefici associati al recupero di energia elettrica e termica dalla combustione stessa;
  - se un elemento dell'impianto è inviato a smaltimento in discarica, i carichi ambientali di tale trattamento sono attribuiti tutti al ciclo di vita dell'impianto FV.

### 1.4. Categorie di impatto analizzate

Nella presente analisi sono state contabilizzate le emissioni di gas ad effetto serra (*GreenHouse Gases*, GHG), espresse in tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente per unità funzionale.

Il calcolo è stato eseguito applicando il metodo di caratterizzazione dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* riportato nel sesto rapporto di valutazione (IPCC, 2021), calcolato su un orizzonte temporale di 100 anni (GWP-100years). Si sottolinea, in particolare, che l'indicatore è stato calcolato secondo due differenti modalità, ossia conteggiando (*con CO<sub>2</sub> uptake*) o non conteggiando (*senza CO<sub>2</sub> uptake*) l'assorbimento di CO<sub>2</sub> da parte degli oliveti e degli alberi di lentisco<sup>1</sup>.

Il software SimaPro 9.3 (fornito da PRé Sustainability), che contiene la versione 3.8 della banca dati internazionale ecoinvent e il suddetto metodo di caratterizzazione, è stato utilizzato per supportare i calcoli dell'analisi.

---

<sup>1</sup> L'assorbimento di anidride carbonica da parte delle barbatelle di vite è stato assunto trascurabile come indicato dettagliatamente al Paragrafo 2.6.

Dopo aver verificato che l'impatto sul cambiamento climatico dell'impianto agrivoltaico risulta essere prevalentemente associato alla funzione di produzione di energia elettrica (si veda il Capitolo 3 *Risultati e Discussione*), è stato calcolato un indice di *payback* utile a quantificare il tempo necessario a recuperare l'investimento in termini di emissioni di CO<sub>2 eq.</sub> per la sola produzione di elettricità da fonte solare. Nello specifico, l'indice selezionato è il *CO<sub>2</sub> Payback Time* (Cellura et al., 2012), che indica in quanto tempo si recuperano le emissioni di CO<sub>2 eq.</sub> stimate per l'intero ciclo di vita dell'impianto fotovoltaico, rapportandole alle mancate emissioni annue dalla fonte di energia fossile che più probabilmente sarà sostituita (gas naturale in un impianto a ciclo combinato nel contesto italiano; formula [2]).

$$CO_2 \text{ payback Time} = \frac{\text{Emissioni } CO_2 \text{ eq. ciclo di vita impianto fotovoltaico (su 30 anni)}}{\text{Emissioni } CO_2 \text{ eq. annue evitate da fonte fossile}} \text{ formula [2]}$$

### 1.5. Qualità dei dati utilizzati

I dati primari utilizzati per la presente valutazione derivano dai progettisti in coerenza con quanto descritto nel progetto definitivo dell'impianto di Palmadula Solar Srl e sono relativi ai seguenti aspetti:

- componenti del parco fotovoltaico (moduli FV, tracker, inverter e cavi): quantità, modello e fornitore, peso, e solo per i cavi, lunghezza, numero di terne e sezione;
- operazioni di cantiere: superficie utile dei lotti, cronoprogramma del cantiere e tipologia di mezzi utilizzati con il relativo numero, volume di terra escavato e avviato a smaltimento, richiesta di calcestruzzo armato per la realizzazione delle platee di fondazione;
- parte agronomica del progetto: numero di piante per le tre tipologie previste.

Tali dati sono stati completati con dati di letteratura e indicazioni di esperti del settore coinvolti nel progetto (agronomi e progettisti).

I processi di *background* (produzione di materia e di energia, trasporti, ...) sono stati modellizzati a partire da dataset specifici disponibili nella banca dati ecoinvent (versione 3.8) per il contesto europeo/italiano, aggiornandoli, laddove necessario, in accordo con le indicazioni di progetto. Per i dettagli di modellizzazione si rimanda al Capitolo 2 (analisi di inventario).

## 2. Analisi di inventario

In questa sezione si riportano i principali dati di inventario e le ipotesi di modellizzazione per le fasi incluse all'interno dei confini dei sistemi dello scenario analizzato.

### 2.1. Ciclo di vita del modulo fotovoltaico (produzione, approvvigionamento e fine vita)

L'impianto prevede l'installazione di 523.180 moduli bifacciali in silicio mono-cristallino marca Trina Solar TSM-NEG21C.20 da 2384 mm × 1303 mm (3,11 m<sup>2</sup> di area) e di potenza 685 W<sub>p</sub>. Poiché i pannelli sono elementi fragili, il numero di moduli richiesto è stato opportunamente aumentato (533.644 moduli) per tenere conto di un loro potenziale danneggiamento sia durante la fase di trasporto e di installazione (0,5% del numero richiesto) che durante i 30 anni di vita utile (0,05%/anno del numero installato; Antonanzas et al., 2019).

La fase di produzione del modulo è stata modellizzata a partire dal dataset della banca dati di ecoinvent (v3.8) *Photovoltaic panel, single-Si wafer {RoW} production*, opportunamente modificato secondo le seguenti indicazioni:

- aggiornamento dei dati di inventario legati alla produzione di silicio, wafer e celle costituenti il modulo in accordo con le indicazioni del recente rapporto sui sistemi fotovoltaici redatto dall'*International Energy Agency* (Frischknecht et al., 2020);
- aggiornamento dei dati di inventario in accordo con il peso dei singoli elementi costituenti il pannello effettivamente adottato dall'impianto (Tabella 1);

- assunzione del mix elettrico cinese nelle diverse fasi di produzione del modulo e dei singoli elementi costituenti, considerato che la società produttrice Trina Solar possiede tre stabilimenti produttivi in questa nazione (fonte: <https://www.trinasolar.com/en-glb/our-company>).

**Tabella 1.** Principali componenti del modulo fotovoltaico Vertex TSM-NEG21C.20. Il peso complessivo del pannello (38,7 kg/pannello ossia 12,5 kg/m<sup>2</sup>) deriva dalla corrispondente scheda tecnica, mentre la scomposizione nei singoli componenti deriva dalla composizione di un pannello bifacciale di una serie simile (TSM-DEG17MC.20; Trina Solar Science & Technology, 2020).

Componente	Massa/m <sup>2</sup> pannello
Celle solari	0,35 kg
Vetro temprato	9,64 kg
Etilen Vinil Acetato – EVA	1,09 kg
Cornice di alluminio	1,01 kg
Busbar (rame)	0,01 kg
Gel di silice	0,14 kg
Cavi di rame stagnato	0,06 kg
Scatola di giunzione	0,16 kg
<i>Peso complessivo</i>	12,5 kg

In relazione alla fase di approvvigionamento dei moduli fotovoltaici, si è ipotizzato un trasporto diretto dalla Cina al cantiere di Palmadula, senza il passaggio da un distributore intermediario in Europa considerata l'elevata quantità di elementi richiesta (questa ipotesi è valida anche per gli inverter e i tracker). Coerentemente con tali indicazioni, sono state previste le seguenti tre fasi di trasporto:

- trasporto dai tre stabilimenti cinesi di produzione Trina Solar al porto di Shanghai per una distanza media di 350 km (valore calcolato tramite il servizio internet geografico *Google Maps*). È stato modellizzato un trasporto con autocarro di massa maggiore di 32 tonnellate, classe Euro 4 (ipotesi adottata per il trasporto di moduli fotovoltaici nel territorio cinese in una recente dichiarazione ambientale di prodotto relativa ai pannelli FV marca LONGi; LONGi Green Energy Technology Co, 2022);
- trasporto via nave in Italia. Non essendo al momento disponibile una tratta diretta di trasporto dal porto cinese di Shanghai a uno dei porti merci in Sardegna, il tragitto è stato diviso su due tratte ossia Shanghai-Genova (con nave transoceanica) e Genova-Porto Torres (con traghetto merci), per una distanza complessiva di 16.180 km (calcolo effettuato con il software *SeaRates* disponibile al seguente [sito](#)). Porto Torres in Sardegna è stato selezionato in quanto rappresenta il porto merci più vicino al cantiere di Palmadula e attualmente sono disponibili delle rotte che prevedono un collegamento diretto con il porto di Genova (si veda come esempio questo [sito](#));
- trasporto da Porto Torres al cantiere, per una distanza di 20 km (media delle distanze di trasporto ai 23 lotti pesata sui pannelli trasportati in ciascuno di essi). È stato modellizzato un trasporto con autocarro di massa > di 32 t, secondo il mix Euro italiano attuale di questa specifica classe di mezzi (48,9% Euro ≤3, 3,8% Euro 4, 3,2% Euro 5 e 44,1% Euro 6; Automobile Club d'Italia, 2023).

In relazione al fine vita, trattandosi di un trattamento che sarà effettuato tra circa 30 anni (al netto dei moduli da sostituire per rotture impreviste), è stato preso come riferimento un processo di riciclo innovativo proposto e testato all'interno del progetto FRELP (*Full Recovery End of Life Phovoltaic*) by SUN portato avanti dall'azienda italiana Tialpi srl ([sito Tialpi srl](#); Latanussa et al., 2016; Aleotti, 2018). Tale processo di riciclo prevede 5 fasi principali:

- separazione della cornice di alluminio, della scatola di giunzione e dei cavi dal pannello vero e proprio;
- distaccamento meccanico del vetro dal sandwich costituito da plastica (Etilene Vinil Acetato - EVA) e da celle di silicio, preservando la purezza del vetro per il recupero come vetro piano e vetro cavo di alto valore;
- distacco, tramite processo termico, dell'EVA dai wafer di silicio e dai metalli;
- recupero del silicio tramite lisciviazione acida;

- recupero dei metalli (argento e rame), inizialmente associati al silicio, tramite elettrolisi.

Nella modellizzazione di tale processo di fine vita, in accordo con l'approccio di modellizzazione del Sistema Internazionale EPD<sup>®</sup>, sono stati inclusi il trasporto al primo impianto di separazione dei principali componenti e nonché i consumi per la suddetta fase di separazione (separazione cornice, cavi, scatola di giunzione e materiali del pannello). In relazione al trasporto, si è considerata una percorrenza media di 200 km tra Palmadula e l'impianto di primo trattamento, stabilita avendo constatato che già oggi esiste sull'isola un impianto gestito da Raee Cycling<sup>2</sup> e dedicato al primo trattamento anche di pannelli fotovoltaici. Il mezzo selezionato è un autocarro di massa > di 32t, di classe Euro 6 (i pannelli saranno smaltiti tra 30 anni e quindi si è selezionata la classe Euro attualmente migliore da un punto di vista degli impatti ambientali).

Per quanto concerne invece la fase di separazione nei principali elementi costituenti, in accordo con i dati a disposizione, è stato conteggiato un consumo elettrico pari a 50 kWh/tonnellata di pannello usato e una richiesta di 10 m<sup>3</sup> di gas naturale/tonnellata di pannello usato (Wambach et al., 2017).

In Tabella A.1 (Appendice A) si riassumono le principali fasi del ciclo di vita del modulo FV e i principali dataset utilizzati per la modellizzazione del ciclo di vita con i dati di inventario costituenti.

## 2.2. Ciclo di vita dell'inverter (produzione, approvvigionamento e fine vita)

L'impianto prevede l'installazione di 1.052 inverter di stringa del modello HAUWEI SUN2000-330KTL-H1, dalla potenza massima di 330 kW per singola unità. In accordo con la relativa scheda tecnica (disponibile al seguente [sito](#)), tale modello di inverter è caratterizzato da dimensioni compatte (1048x732x395mm) e da un peso di 112 kg. Su specifica indicazione di un recente report della Commissione Europea, è stata cautelativamente considerata la sostituzione del 10% del numero complessivo ogni 10 anni (Dodd et al., 2020). Il numero di inverter da produrre, trasportare e smaltire è quindi pari a 1.368.

Il processo di produzione degli inverter è stato modellizzato a partire dal dataset della banca dati ecoinvent v3.8 *Inverter, 500kW {RoW}| production*, opportunamente modificato in accordo con il peso dell'inverter adottato (112 kg anziché 2992 kg come previsto originariamente dalla banca dati) e considerando per i consumi elettrici di produzione il mix cinese, nazione in cui è localizzato lo stabilimento produttivo dell'azienda HUAWEI. Per maggiori dettagli su tale modellizzazione si rimanda all'Appendice B (Tabella B.1).

In relazione all'approvvigionamento, sono state considerate le seguenti fasi:

- trasporto dallo stabilimento di produzione HAUWEI al porto di Shenzhen per una distanza media di 70 km (HUAWEI, 2021). È stato modellizzato un trasporto con autocarro di massa maggiore di 32 tonnellate, classe Euro 4 (ipotesi adottata per il trasporto di prodotti fotovoltaici sul territorio cinese in una recente dichiarazione ambientale di prodotto relativa ai moduli FV di marca LONGi);
- trasporto con nave transoceanica dal porto di Shenzhen al porto di Genova (14.430 km) e successivamente con traghetto merci a quello di Porto Torres (405 km);
- trasporto da Porto Torres al cantiere, per una distanza di 20 km (media delle distanze di trasporto ai 23 lotti pesata sugli inverter trasportati in ciascuno di essi). È stato modellizzato un trasporto con autocarro di massa maggiore di 32 tonnellate, secondo il mix Euro italiano attuale per questa specifica classe di automezzi (Automobile Club d'Italia - ACI, 2023).

In relazione al fine vita, è stato ipotizzato un conferimento del rifiuto a un impianto di selezione dei Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE) per la separazione dei singoli componenti costituenti l'inverter. Qui si suppone che i metalli (alluminio, acciaio e rame) e le componenti elettroniche siano avviate a riciclo, mentre le componenti plastiche rinforzate con fibra di vetro, il polietilene con annessa vernice e l'olio esausto siano destinati a un processo di incenerimento. In accordo con l'approccio di modellizzazione dell'International EPD<sup>®</sup> System sono state quindi modellizzate le seguenti fasi:

<sup>2</sup> Tale società si occupa del ritiro dei RAEE in Sardegna e gestisce un impianto di recupero che effettua una riduzione granulometrica del materiale e il relativo disassemblaggio per la separazione dei singoli componenti. Dall'Autorizzazione Provinciale dell'impianto (reperibile al presente [sito](#)) è possibile vedere che la società gestisce anche il codice CER 16.02.14 a cui sono associati i pannelli fotovoltaici.

- trasporto al primo impianto di trattamento dei RAEE localizzato a 200 km (distanza stabilita in base alla localizzazione di un impianto attuale di primo trattamento RAEE in Sardegna). Tale trasporto si suppone effettuato con mezzi di grandi dimensioni (massa lorda maggiore di 32 tonnellate), classe Euro 6 (lo smaltimento della maggior parte delle apparecchiature avverrà tra 30 anni);
- consumo elettrico per la separazione dei singoli componenti supposto pari a 66 kWh/t rifiuto (Falbo et al., 2015). Tale valore deriva da un impianto di primo trattamento dei RAEE localizzato in Lombardia, ed è specifico per i RAEE di raggruppamento R4 a cui attualmente sono assoggettati i pannelli fotovoltaici e i loro componenti accessori;
- incenerimento di rifiuti plastici rinforzati con fibra di vetro, olio esausto, polietilene e vernice.

In Tabella A.2 (Appendice A) si riassumono le principali fasi del ciclo di vita dell'inverter, i dati di inventario e i principali dataset utilizzati per la modellizzazione del ciclo di vita descritto.

### 2.3. Ciclo di vita dei sistemi a inseguimento (produzione, approvvigionamento e fine vita)

Durante la realizzazione dell'impianto di Palmadula saranno installati sistemi a inseguimento solare mono-assiale anche detti *tracker*, su cui posizionare i moduli FV. Sono stati selezionati, in particolare, sistemi del tipo PVH Monoline 2P caratterizzati da un peso medio di 1,17 t/unità e da un'area di circa 90 m<sup>2</sup>. Il numero richiesto teoricamente da progetto è pari a 18.685 ma nella presente analisi è stato modellizzato il ciclo di vita di 21.488 strutture assumendone cautelativamente la sostituzione del 5% ogni 10 anni (procedura del tutto simile a quanto effettuato per gli inverter).

In relazione al processo produttivo, è stata modellizzata la realizzazione dell'acciaio zincato a caldo, che rappresenta il principale materiale costituente il tracker. In tale modellizzazione, per il mix energetico di lavorazione del metallo, è stato assunto come riferimento il contesto spagnolo visto che lo stabilimento europeo del produttore PVH è localizzato a Valencia (informazione disponibile al seguente [sito](#)).

Per la fase di approvvigionamento, sono stati quindi previsti i seguenti trasporti:

- trasporto dallo stabilimento di produzione dell'azienda PVH al porto di Valencia per una distanza media di 37 km (calcolata con *Google Maps*), supposta effettuata con autocarro di massa > 32 t, classe Euro 4;
- trasporto con traghetto merci dal porto di Valencia a Porto Torres, tramite passaggio da Barcellona, per una distanza media di 850 km, ricavata con il software *SeaRates* (è stata verificata l'esistenza di una tratta navale; si veda il seguente [sito](#) a titolo di esempio);
- trasporto da Porto Torres al cantiere, per una distanza media di 20 km (valore da ricavato *Google Maps* in accordo con la localizzazione dei 23 lotti di cantiere). È stato modellizzato un trasporto con autocarro di massa > 32 t, secondo il mix Euro italiano attuale per questa specifica classe di autocarri (ACI, 2023).

Per quanto concerne il fine vita, si è supposto che gli inseguitori, dopo la fase d'uso, siano avviati a riciclo essendo realizzati prevalentemente in acciaio. Come indicato dall'approccio dell'International EPD<sup>®</sup> System, si è incluso il solo conferimento all'impianto di riciclo distante 50 km (valore stabilito dopo aver verificato, nelle vicinanze di Palmadula, l'esistenza di impianti specializzati nel recupero di rifiuti in acciaio quali [R.G.M.](#) a Muros). Tale trasporto è stato modellizzato con autocarro > 32 tonnellate, classe Euro 6 (il trattamento avverrà prevalentemente tra 30 anni e quindi è stata scelta la classe Euro migliore disponibile al momento).

La Tabella A.3 (Appendice A) riporta i dettagli di modellizzazione del ciclo di vita di un sistema ad inseguimento.

### 2.4. Ciclo di vita dei cavi (produzione, approvvigionamento e fine vita)

Nell'analisi effettuata è stato incluso il ciclo di vita di tutte le tipologie di cavi utilizzati nel parco fotovoltaico di Palmadula ossia cavi per correnti continue, cavi in bassa tensione, cavi in media tensione e cavi in alta tensione i cui dati per la modellizzazione sono disponibili nei paragrafi che seguono.

In termini generali, la modellizzazione del ciclo di vita delle suddette tipologie di cavi ha compreso la fase produttiva, l'approvvigionamento e il fine vita. I carichi ambientali associati alla posa presso il cantiere di Palmadula sono stati invece opportunamente conteggiati nella fase di cantierizzazione (Paragrafo 2.5).

Per la fase produttiva delle diverse tipologie di cavi, è stato realizzato un apposito modulo (Tabella A.4 in Appendice A) che contiene specifici dataset della banca dati diecoinvent v3.8 relativi alla produzione dei singoli materiali costituenti il cavo e alla loro lavorazione.

In relazione all'approvvigionamento, si è invece assunto che i cavi siano prodotti in Italia considerando una delle aziende di maggiori dimensioni nel contesto nazionale, che ha fornito le schede tecniche di riferimento per alcuni modelli che saranno utilizzati. Tale azienda dispone di uno stabilimento a Pioltello Limito (MI) e, coerentemente con tale ipotesi, è stato modellizzato un trasporto con autocarro di grandi dimensioni (taglia >32 tonnellate) fino a Genova (distanza di 160 km), successivamente un trasporto tramite traghetto merci Genova-Porto Torres (405 km) da cui poi si raggiunge Palmadula a 20 km di distanza stradale percorsi con autocarro di massa maggiore di 32 tonnellate.

In relazione al fine vita, si è ipotizzato che, dopo 30 anni, i cavi siano rimossi dalla loro posa e siano conferiti a un impianto nazionale distante 200 km (distanza stabilita in base alla localizzazione di un impianto attuale di trattamento di tali rifiuti in Sardegna). Presso tale impianto avviene la separazione dei singoli componenti e i metalli (alluminio, rame e piombo) sono avviati a riciclo (processo non incluso secondo l'approccio di modellizzazione dell'International EPD® System), mentre le componenti in plastica e in gomma sono inviate a incenerimento. Tale operazione di separazione richiede un consumo elettrico di 180 Wh/kg cavo avviato a trattamento (Hischier et al., 2007). I paragrafi che seguono riportano nel dettaglio le caratteristiche dei cavi considerati in termini di modello, lunghezza complessiva e composizione.

#### 2.4.1. Cavi per corrente continua

I cavi di cui al presente paragrafo collegano la fine della stringa fotovoltaica (polo positivo e polo negativo) all'inverter. I cavi impiegati saranno del tipo H1Z2Z2-K realizzati con conduttore in corda flessibile di rame stagnato e isolante e guaina esterna in miscela di gomma reticolata. La tipologia di cavo prescelta è caratterizzata da una sezione di 6 mm<sup>2</sup> e peso complessivo di 80 kg/km (72% rame stagnato e 28% gomma reticolata) in accordo con la scheda tecnica del prodotto disponibile nel [sito](#) dell'azienda Helukabel Ltd. In accordo con i dati di progetto, complessivamente serviranno 3.765 km di tale tipologia di cavo. Per la modellizzazione dei carichi ambientali della produzione di tale cavo, è stata trascurata la stagnatura del rame per l'assenza di un dataset dedicato, mentre per l'elastomero reticolato è stata considerata la produzione di gomma sintetica.

#### 2.4.2. Cavi bassa tensione

I cavi di bassa tensione utilizzati per il parco fotovoltaico di Palmadula sono di due differenti tipologie: cavi alla tensione di 400V (modello FG16(O)R16) e cavi alla tensione di 800V (modello ARG16R16).

Come visibile in Tabella 2, i cavi elettrici modello FG16(O)R16 impiegati hanno un conduttore in corda rotonda di rame, isolamento in miscela di gomma e guaina esterna in PoliVinilCloruro (PVC).

**Tabella 2.** Caratteristiche dei cavi alla tensione di 400V di tipologia FG16(O)R16 inseriti nella progettazione dell'impianto fotovoltaico di Palmadula (la lunghezza è un dato primario dei progettisti, mentre il peso complessivo e la composizione derivano dalla relativa scheda tecnica).

Identificazione cavo	Peso [kg/km] <sup>a</sup>	Composizione [%] <sup>b</sup>	Lunghezza complessiva
5G 4 (5 conduttori, sezione 4 mm <sup>2</sup> )	400	56% rame 13% gomma 31% PVC	117,0 km
5G 6 (5 conduttori, sezione 6 mm <sup>2</sup> )	520	63% rame 12% gomma 25% PVC	153,9 km
3G 1,5 (3 conduttori)	170	29% rame 12% gomma 59% PVC	17,7 km

<sup>a</sup> Fonte [scheda tecnica](#) Prysmian Group. <sup>b</sup> Il contenuto di rame in massa deriva da indicazioni riportate nella [scheda tecnica](#) dei medesimi cavi fornita dall'azienda TESTA KABELI d.o.o. Il rimanente contenuto è stato ripartito tra PVC e gomma in accordo con le densità dei materiali e lo spessore dello strato isolante e della guaina esterna del cavo.

Il modello ARG16R16, invece, prevede l'uso di un conduttore in corda di alluminio mentre lo strato di isolamento e la guaina sono realizzati sempre in gomma e in PVC (Tabella 3).

**Tabella 3.** Caratteristiche dei cavi alla tensione di 800V di tipologia ARG16R16 inseriti nella progettazione dell'impianto fotovoltaico di Palmadula (la lunghezza è un dato primario dei progettisti, mentre il peso complessivo e la composizione derivano dalla relativa scheda tecnica).

Sezione cavo	Peso [kg/km] <sup>a</sup>	Composizione [%] <sup>b</sup>	Lunghezza complessiva
150 mm <sup>2</sup> (14,4 mm di diametro)	596	68% alluminio 15% gomma 17% PVC	946,8 km
300 mm <sup>2</sup> (20,7 mm di diametro)	1.122	72% alluminio 15% gomma 13% PVC	315,6 km

<sup>a</sup> Fonte [scheda tecnica](#) dell'azienda Baldassari Cavi. <sup>b</sup> Il peso dei singoli materiali costituenti il cavo è stato ricavato in accordo con le densità dei singoli materiali e con lo spessore del conduttore, dello strato isolante e della guaina esterna nel cavo preso in considerazione.

#### 2.4.3. Cavi media tensione

I cavi a media tensione sono della tipologia ARG7H1R (18/30 kV), con conduttore in alluminio, isolati in gomma HEPR, schermatura in fili di rame e guaina di miscela a base di PVC. Le caratteristiche dei suddetti cavi per il cantiere di Palmadula sono indicate in Tabella 4.

**Tabella 4.** Caratteristiche dei cavi 18/30 kV di tipologia ARG7H1R inseriti nella progettazione dell'impianto fotovoltaico di Palmadula (la lunghezza è un dato primario dei progettisti, mentre il peso complessivo e la composizione derivano dalla relativa scheda tecnica).

Sezione cavo [mm <sup>2</sup> ]	Peso [kg/km]	Componenti [%] <sup>1</sup>	Lunghezza complessiva
120	1.650	22% Al 17% gomma 12% Cu 49% PVC	119,42
185	2.020	28% Al 14% gomma 15% Cu 43% PVC	231,72
300	2.620	36% Al 13% gomma 12% Cu 39% PVC	321,00

<sup>1</sup> Il contenuto di alluminio e di rame deriva da indicazioni riportate nel catalogo prodotti Alkabel® disponibile online [qui](#). Il rimanente contenuto è stato ripartito tra PVC (75% in peso) e gomma (25% in peso) in accordo con le indicazioni riportate in Amo installationskabel (2021).

#### 2.4.4. Cavi alta tensione

I cavi di alta tensione richiesti per il cantiere di Palmadula possiedono le seguenti caratteristiche:

- cavo di lunghezza 7 km da 150 kV, con conduttore in rame (sezione di 400 mm<sup>2</sup>), isolato in polietilene reticolato e dotato di rivestimento in piombo e polietilene;

- cavo di lunghezza 17 km da 380 kV, con conduttore in rame (sezione di 2500 mm<sup>2</sup>), isolato in polietilene reticolato (XLPE) e dotato di rivestimento in piombo e polietilene.

Il peso complessivo per ciascuna tipologia di cavo e la relativa composizione in termini di materiali costituenti dedotta dalle schede tecniche è disponibile in Tabella 5.

**Tabella 5.** Caratteristiche dei cavi ad alta tensione inseriti nella progettazione dell'impianto fotovoltaico di Palmadula (dati primari eccetto per la composizione in termini di materiali costituenti).

Tipologia	Peso [kg/km]	Componenti [%] <sup>a</sup>	Lunghezza complessiva
150 kV (Cu-XLPE-Piombo-PE)	17.000 (diametro conduttore 23,2 mm)	30% Cu 46% piombo 24% altro (PE)	7 km
380 kV (Cu-XLPE-Piombo-PE)	51.000 (diametro conduttore 63,5 mm)	43% Cu 42% piombo 15% altro (PE)	17 km

<sup>a</sup> Il peso percentuale dei singoli materiali costituenti (rame, piombo e polietilene) per la tipologia di cavo indicata è stato ricavato a partire dai valori geometrici del cavo (diametro conduttore, spessore isolante, spessore rivestimento in piombo e in polietilene; Fonte: 150 kV - LS Leading Solution (2023); 380 kV - Riyadh Cables Group Company, 2023) e dalle densità delle corde in rame (9.100 kg/m<sup>3</sup>; [catalogo](#) Alfa Trafili S.r.l.) e dei fili di piombo (11.300 kg/m<sup>3</sup>; [indicazioni](#) di FBR Cables).

## 2.5. Cantierizzazione

La modellizzazione della fase di cantierizzazione ha incluso i seguenti contributi:

- sfalcatura degli appezzamenti di terreno coinvolti nella realizzazione dell'impianto fotovoltaico;
- consumo di diesel (approvvigionamento e relativa combustione) per il funzionamento dei macchinari adoperati nelle operazioni di cantiere (il conto non include il consumo di autogrù, macchina battipalo e piattaforma elevatrice per cui non è stato possibile reperire dati di funzionamento adeguati alla modellizzazione). Tale consumo è stato raddoppiato assumendo che i medesimi macchinari saranno coinvolti, con le stesse modalità, anche in fase di dismissione dell'impianto (dopo 30 anni);
- conferimento in discarica e relativo smaltimento della terra ottenuta dalle operazioni di scavo al netto del materiale che sarà recuperato presso il cantiere di Palmadula;
- produzione di calcestruzzo per la realizzazione delle platee di fondazione per le cabine secondarie (power stations) e per l'impianto di accumulo.

I dati di inventario (riassunti in Tabella 6) sono di origine primaria, in accordo con quanto indicato nella relazione tecnica di progetto. In particolare, il consumo di diesel (complessivo per i diversi macchinari coinvolti in fase di cantiere) è stato ricavato coerentemente con le seguenti ipotesi:

- i mezzi di cantiere lavorano con la massima potenza operante del motore, 2 ore al giorno, per un numero di giorni stimato sulla base del cronoprogramma di progetto (dettagli di calcolo in Tabella C.1);
- il consumo di combustibile dei suddetti mezzi (espresso in g/kWh) è stato desunto dal documento "EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019" che esprime tale grandezza in funzione della potenza del macchinario e della tecnologia di motore (per ipotesi Stage IV).

**Tabella 6.** Elenco delle principali operazioni conteggiate per il cantiere di Palmadula insieme con i dati di inventario e i dataset di ecoinvent v3.8 utilizzati nella modellizzazione LCA.

Operazione	Dato disponibile	Dataset di ecoinvent v3.8
Sfalciatura	Ettari di terreno dei 23 lotti da sfalciare: 751 ha	Mowing, by rotary mower {RoW}  processing
Gestione del materiale da fase di escavazione	Trasporto del materiale non recuperato in sito a discarica (distante, per ipotesi, 200 km avendo verificato la presenza di discariche per inerti in Sardegna)	Transport, freight, lorry >32 metric ton, mix Euro Italia dell'anno 2022 (ACI, 2023)
	Smaltimento in discarica di terre: 26.100 t <sup>a</sup> (valore al netto del materiale riutilizzato in sito)	Inert waste {Europe without Switzerland}  sanitary landfill
Richiesta di calcestruzzo armato per le platee di fondazione delle cabine secondarie e dell'impianto di accumulo	Volume richiesto <sup>b</sup> : 315 m <sup>3</sup>	Concrete slab {RER}  production (tolto il consumo elettrico della betoniera essendo conteggiato il consumo di diesel da dato primario)
Consumi di diesel e relative emissioni da combustione per i principali macchinari di cantiere	4.224 t <sup>c</sup> (183.652 GJ sapendo che 1 MJ richiede 23 grammi di diesel)	Diesel, burned in building machine {GLO}  market for

<sup>a</sup> Il volume di terra da conferire in discarica (18.620 m<sup>3</sup>; dato primario) è stato convertito in massa di materiale assumendo un peso specifico di 1,8 t/m<sup>3</sup>. <sup>b</sup> Valore calcolato considerando che nei 23 lotti è prevista l'installazione di 47 cabine secondarie (power units) e 15 unità modulari per l'impianto di accumulo (ogni unità è dotata di 3 container di dimensioni simili alle cabine secondarie) che necessitano della presenza di una platea di fondazione. Il quantitativo di calcestruzzo richiesto è stato calcolato in accordo con la struttura geometrica e le dimensioni di tale fondazione, informazioni fornite dal fornitore scelto per le cabine secondarie. Si segnala che la quantità di calcestruzzo indicata è sottostimata rispetto alle esigenze reali in quanto manca il volume di calcestruzzo richiesto per le fondazioni associate alle due sottostazioni elettriche utenti, di cui non si disponevano dati sufficientemente rappresentativi per la modellizzazione. <sup>c</sup> Il consumo previsto per il cantiere di installazione è stato raddoppiato assumendo che i medesimi macchinari saranno coinvolti, con le stesse modalità, anche in fase di dismissione dell'impianto.

## 2.6. Coltivazione delle piante previste

Come anticipato, il progetto definitivo prevede la coltivazione di 62.625 piante di cui 19.371 olivi, 15.408 alberi di lentisco e 27.846 barbatelle di vite. Per ciascuna tipologia, sono stati consultati agronomi e fonti di letteratura per modellizzare sia gli impatti associati al relativo ciclo produttivo (messa a dimora, concimazione, fertilizzazione e operazioni colturali) che l'eventuale assorbimento di anidride carbonica nei 30 anni di vita dell'impianto agrivoltaico. Per la modellizzazione di tali carichi, in assenza di informazioni specifiche, si è assunto che la consociazione di piante e tracker non influenzi la gestione e la crescita delle piante stesse rispetto alla pratica tradizionale, tenuto conto che le zone occupate dai tracker e dalla loro area di proiezione sono state assunte non coltivabili nel progetto definitivo.

Partendo dall'olivo, per quanto concerne il ciclo produttivo, è stato consultato lo studio di Proietti et al. (2014), focalizzato sulla gestione di un oliveto nel Centro Italia, caratterizzato da una densità di impianto di 330 alberi/ha. In accordo con i dati desunti da tale studio (Tabella 7), sono stati calcolati i carichi ambientali, su 30 anni, relativi alla gestione di una pianta di olivo (132 kg CO<sub>2</sub> eq./albero) che riguardano nello specifico la fase di messa a dimora, l'uso dei fertilizzanti e dei fitofarmaci (produzione e spargimento) e le operazioni colturali (potatura, cippatura dei residui di potatura e raccolta delle olive).

È stata inoltre dedotta la quantità di CO<sub>2</sub> stoccata nelle strutture vegetali della pianta (-339 kg CO<sub>2</sub> eq./albero), in accordo con le seguenti assunzioni:

- la quantità annuale di anidride carbonica assimilata è pari a 3 kg/pianta/anno per i primi 25 anni di vita (escluso il primo anno per cui si assume un valore nullo) e a 76 kg/pianta/anno per il periodo successivo (fino ai 30 anni di vita utile dell'impianto), in accordo con informazioni specifiche riportate nella banca dati dell'Associazione Vivaisti Italiani ([sito](#)) per la specie di pianta in analisi (*Olea Europaea*) caratterizzata da una vita media centenaria;
- esclusione del tasso di assorbimento di CO<sub>2</sub> associato ai residui di potatura e alle olive (25% in accordo con Proietti et al., 2014) in quanto si tratta di carbonio riemesso nel breve tempo.

**Tabella 7.** Emissione di CO<sub>2</sub> equivalente associata alla coltivazione di un ettaro di oliveto nei 30 anni (Proietti et al., 2014). Il calcolo dei carichi ambientali è effettuato da tali autori secondo il modello IPCC (2013).

	Anno											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	da 12-30 <sup>a</sup>
Carico ambientale (t CO <sub>2</sub> eq./ha)	2,89	1,25	1,25	1,25	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42

<sup>a</sup>La fonte di riferimento riporta il valore di impatto solo fino all'undicesimo anno di vita; il valore di impatto associato a tale anno è stato ritenuto valido anche dal dodicesimo anno di vita in poi.

In relazione alle viti, i carichi ambientali relativi alla fase di gestione in campo per 30 anni (piantazione, mantenimento e raccolta dell'uva) sono stati dedotti facendo riferimento all'analisi di carbon footprint redatta da Bosco et al. (2011) per tre vigneti toscani caratterizzati da un tasso di produttività e da un orizzonte di vita media simili a quelli previsti per il progetto di Palmadula (Tabella 8). Coerentemente con tale lavoro (i cui valori di impatto sono stati confermati anche da Rowe et al., 2013 e da Falcone et al., 2015), il carico ambientale associato alla gestione del vigneto nei 30 anni risulta di 5,79 kg CO<sub>2</sub> eq./albero. L'assorbimento di anidride carbonica da parte di questa tipologia di pianta, invece, è stato trascurato in quanto la barbatella di vite è caratterizzata da una struttura lignea ridotta (50-60 cm di fusto e diametro massimo di 4-5 cm). Gran parte della CO<sub>2</sub> assorbita è associata ai frutti e ai residui di potatura trinciati e si tratta quindi di carbonio riemesso nel breve tempo.

**Tabella 8.** Dati per il calcolo dell'emissione di CO<sub>2</sub> equivalente media da parte di un vigneto riportati nel lavoro di Bosco et al. (2011). Il calcolo dei carichi ambientali è stato effettuato da tali autori secondo il modello IPCC (2006). Per lo studio è stato considerato il valor medio del valore di emissione risultante dai tre casi studio di vigneti.

Parametro	Vigneto 1	Vigneto 2	Vigneto 3
Produttività vigneto (t/ha)	5	6	9
Piante per un ettaro	4.440	4.000	3.767
Quantitativi d'uva richiesti per produrre 0,75L di vino (kg)	1,33	1,08	1,24
Impatti fase di piantagione di durata 3 anni (kg CO <sub>2</sub> eq./0,75L)	0,09	0,02	0,04
Impatti fase di lavorazione in campo <sup>a</sup> (kg CO <sub>2</sub> eq./0,75L)	0,24	0,2	0,08

<sup>a</sup> Da intendersi come valore annuale che, per il presente lavoro, sarà moltiplicato per 27 anni di vita effettiva.

Infine, per quanto concerne gli alberi di lentisco, non essendo disponibili informazioni in letteratura in merito ai carichi ambientali associati alla relativa gestione in campo, d'accordo con il parere degli agronomi di progetto, si è stabilito di considerare lo stesso valore di impatto identificato per la pianta di olivo in 30 anni di gestione (132 kg CO<sub>2</sub> eq./albero). Questa assunzione deriva dal fatto che, pur trattandosi di piante differenti, le modalità di coltivazione previste saranno del tutto analoghe (allevamento a siepe). La quantità di CO<sub>2</sub> stoccata nelle strutture vegetali della pianta di lentisco, pari a 114 kg CO<sub>2</sub> eq./albero, è stata invece ricavata in accordo con le seguenti assunzioni:

- quantità annuale di anidride carbonica assimilata pari a 3 kg/pianta/anno per i primi 25 anni di vita (escluso il primo anno per cui si assume un valore nullo) in accordo con quanto già modellizzato per le piante di olivo e a 16 kgCO<sub>2</sub> eq./anno/pianta per i rimanenti 5 anni (valore medio di assorbimento per piante arbustive considerato in precedenti analisi ambientali su parchi agrivoltaici);
- esclusione del tasso di assorbimento di CO<sub>2</sub> associato ai residui di potatura e alle drupe (25% in accordo con quanto già considerato per le piante di olivo in assenza di dati).

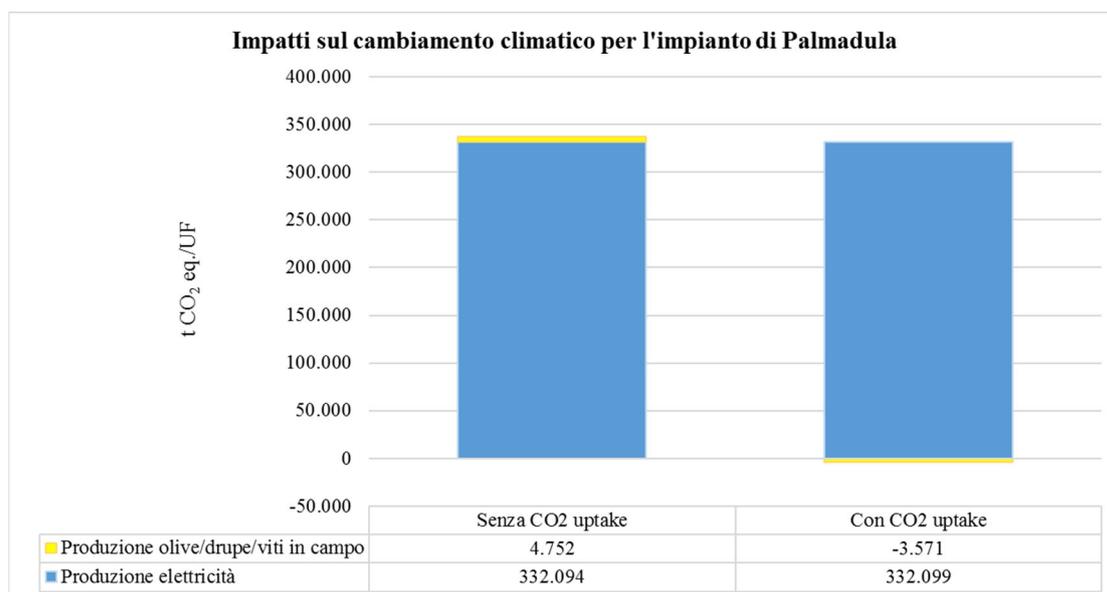
La tabella 9 riassume, per ciascuna tipologia di pianta, i valori di impatto ambientale indicati sia in termini di gestione in campo che di eventuale assorbimento.

**Tabella 9.** Carichi ambientali sul cambiamento climatico associati alla gestione in campo delle tre tipologie di piante presenti nell'impianto di Palmadula (messa a dimora, concimazione e operazioni colturali) ed eventuale assorbimento di anidride carbonica nella struttura vegetale per i 30 anni di esercizio.

Operazione	Numero piante	Impatti gestione in campo in 30 anni	Assorbimento in 30 anni
Piante di olivo	19.371	132 kg CO <sub>2</sub> eq./albero	-339 kg CO <sub>2</sub> eq./albero
Alberi di lentisco	15.408	132 kg CO <sub>2</sub> eq./albero	-114 kg CO <sub>2</sub> eq./albero
Barbatelle di vite	27.846	5,79 kg CO <sub>2</sub> eq./albero	Trascurabile

### 3. Risultati e discussione

In Figura 2 si riporta il valore dell'indicatore di impatto sul cambiamento climatico espresso in termini di tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente/unità funzionale per lo scenario relativo al ciclo di vita dell'impianto agrivoltaico di Palmadula (calcolo effettuato senza o con il contributo di *CO<sub>2</sub> uptake*). La Figura 2 evidenzia, inoltre, la ripartizione dell'impatto tra le due funzioni analizzate: produzione di elettricità e produzione di olive/drupe/viti in campo (coltivazione di alberi di olivi, alberi di lentisco e barbatella di vite) per 30 anni.



**Figura 2.** Impatto sul cambiamento climatico (calcolo dell'indicatore GWP100 senza o con il contributo di *CO<sub>2</sub> uptake*) e relativa analisi dei contributi per l'impianto agrivoltaico di Palmadula. Il valore di impatto è espresso in termini di tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente per unità funzionale (la produzione di 18.817 GWh di energia elettrica al netto degli autoconsumi e la coltivazione di 62.625 piante in campo, in un arco temporale di 30 anni).

In termini di cambiamento climatico, l'impatto totale dell'impianto agrivoltaico, nei 30 anni di vita, risulta essere pari a 328.527-336.846 t CO<sub>2</sub> equivalente/UF, a seconda dell'approccio di calcolo adottato (con o senza l'inclusione dell'assorbimento di anidride carbonica da parte delle piante in campo). Rispetto all'impatto

totale, il contributo associato alla produzione di elettricità da fonte solare è predominante, mentre quello riconducibile alla coltivazione di oliveti, lentischi e barbatelle di vite è di entità minima.

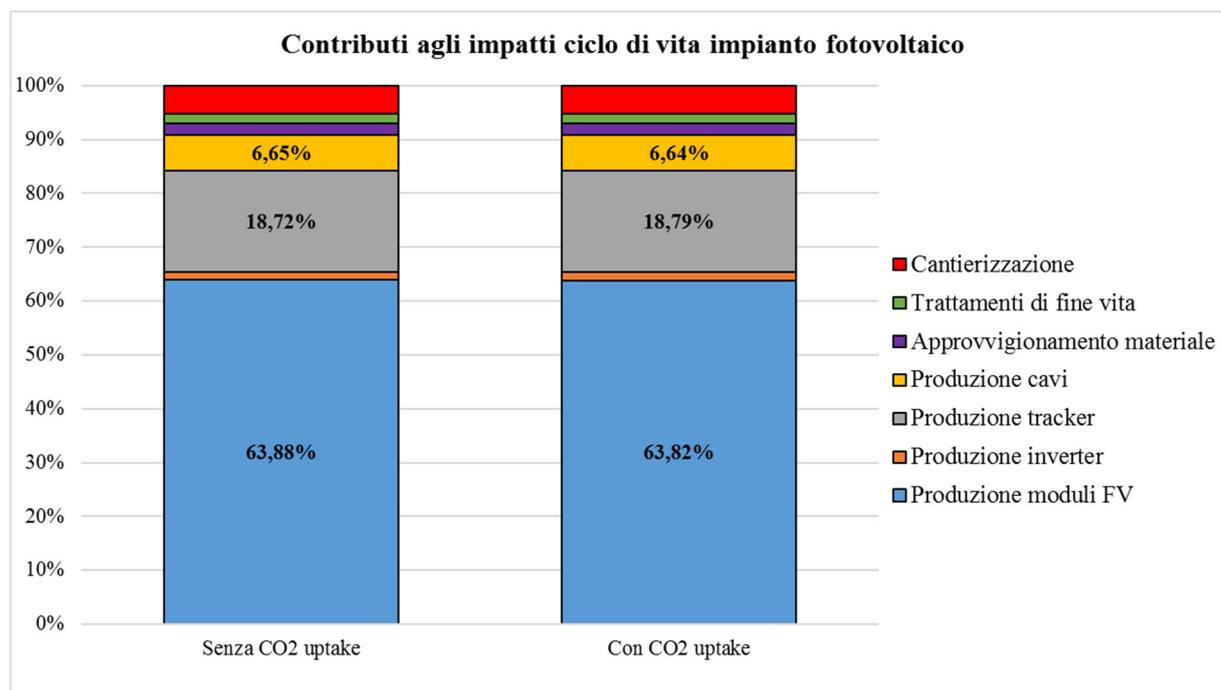
Focalizzandosi quindi sulla sola funzione di produzione dell'elettricità (Figura 3), emerge che il 64% circa del carico ambientale complessivo dell'impianto fotovoltaico è associato alla sola produzione dei moduli FV, prioritariamente alla lavorazione del silicio che li costituisce. Anche la fase produttiva dei tracker comporta un contributo rilevante (19% dell'impatto complessivo), per la realizzazione dell'acciaio che è il componente principale di tali strutture. Il contributo relativo alla produzione dei cavi elettrici è più contenuto (circa 7%) ed è prevalentemente riconducibile ai cavi di tipologia ARG7H1R di media tensione (18/30 kV) e modello ARG16R16 alla tensione di 800V. Infine, la fase di realizzazione degli inverter determina un impatto sotto il 2%, grazie al fatto che sono necessarie meno unità rispetto ai tracker e ai moduli FV e oltretutto il peso della singola unità è abbastanza contenuto (112 kg).

Passando all'approvvigionamento dei singoli componenti, l'impatto di tale fase è poco significativo (intorno al 2% dell'impatto complessivo) poiché, seppur alcuni elementi siano reperiti in Cina, la maggior parte dei chilometri sono percorsi con nave, modalità di trasporto più sostenibile rispetto alla percorrenza su strada.

Per quanto concerne le operazioni di installazione e smantellamento dell'impianto (cantierizzazione), si sottolinea che tale fase determina impatti ridotti sul cambiamento climatico (contributo circa del 5%) e i carichi ambientali sono prevalentemente associati al consumo di diesel richiesto dai diversi macchinari da lavoro coinvolti.

Da ultimo, il fine vita dei singoli componenti fornisce carichi ambientali trascurabili (sotto l'1,7%), grazie al fatto che la maggior parte degli elementi sarà avviato a un processo di riciclo anziché a smaltimento.

Le suddette considerazioni sull'impianto fotovoltaico per la produzione di elettricità valgono per entrambe le modalità di calcolo dell'indicatore GWP100 (con e senza *CO<sub>2</sub> uptake*).



**Figura 3.** Principali contributi all'impatto sul cambiamento climatico per il ciclo di vita dell'impianto fotovoltaico di Palmadula (produzione di energia elettrica da fonte solare per 30 anni).

Dopo aver constatato che l'impatto dell'impianto agrivoltaico risulta essere prevalentemente associato alla funzione di produzione di energia elettrica, è stato calcolato l'indice *CO<sub>2</sub> Payback Time* (Formola [2]; Paragrafo 1.4), per agevolare l'interpretazione dei risultati e quantificare il beneficio legato all'uso di una fonte di energia rinnovabile rispetto a una fonte fossile convenzionale. Nel calcolo di tale indice, il gas naturale utilizzato in un impianto a ciclo combinato è stato assunto come fonte fossile più probabilmente sostituita nel

contesto italiano, considerando un fattore di impatto sul cambiamento climatico pari a 459 grammi CO<sub>2</sub>eq./kWh (banca dati ecoinvent v3.8) e mediamente una produzione annua dell'impianto pari a 685 GWh/anno<sup>3</sup>. L'indice così calcolato evidenzia che le emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente dell'intero ciclo di vita dell'impianto fotovoltaico si recuperano entro i 14 mesi di vita operativa, rapportandole alle mancate emissioni annue che si causerebbero con la combustione di gas naturale per la produzione della stessa quantità di energia.

## 4. Conclusioni

L'impianto agrivoltaico analizzato da realizzarsi nei pressi di Palmadula (Sassari) prevede la produzione di energia elettrica da fonte solare tramite 523.180 moduli fotovoltaici (18.817 GWh immessi in rete in 30 anni) e contestualmente la gestione in campo di 62.625 piante (alberi di olivo, alberi di lentisco e barbatelle di vite). Il presente studio di *carbon footprint* ha valutato l'impatto sul cambiamento climatico del ciclo di vita di tale impianto agrivoltaico con i seguenti obiettivi:

- comprendere quali siano le fasi più impattanti all'interno del ciclo di vita già in fase di definizione del layout;
- quantificare l'effettivo beneficio sul cambiamento climatico associato alla produzione di energia elettrica dall'impianto fotovoltaico rispetto a un sistema tradizionale di produzione da fonte fossile attraverso il calcolo di uno specifico indice di *payback*.

La valutazione sull'impianto agrivoltaico è stata effettuata prevalentemente con dati primari derivanti dalla relativa relazione di progetto, comprendendo le seguenti fasi del ciclo di vita: i) produzione, approvvigionamento e fine vita dei principali componenti dell'impianto fotovoltaico (moduli fotovoltaici, inverter, cavi e tracker); ii) operazioni di cantiere per l'installazione e la dismissione; iii) gestione delle piante previste in 30 anni.

Il calcolo è stato eseguito applicando il metodo IPCC 2021, *Global Warming Potential* 100 anni (versione 1.00), con e senza il contributo di *CO<sub>2</sub> uptake* da parte degli oliveti e degli alberi di lentisco.

Dai risultati dell'analisi effettuata emergono le seguenti considerazioni:

- lo scenario di progetto relativo all'impianto agrivoltaico di Palmadula genera un impatto sul cambiamento climatico di 328.527-336.846 t CO<sub>2</sub> equivalente/UF in 30 anni, in accordo con le modalità di calcolo dell'indicatore GWP<sub>100</sub> (con o senza il contributo di *CO<sub>2</sub> uptake*);
- nel sistema agrivoltaico, il contributo associato alla produzione di elettricità è predominante, mentre quello riconducibile alla gestione degli alberi previsti è di entità minima;
- nel ciclo di vita del solo impianto fotovoltaico (escludendo quindi la funzione agronomica), il 64% dell'impatto sul cambiamento climatico è associato alla produzione dei moduli fotovoltaici e il 19% alla realizzazione dei tracker in acciaio.

Dal calcolo dell'indice *CO<sub>2</sub> Payback Time* (relativo alla sola funzione di produzione di elettricità), risulta che le emissioni dell'intero ciclo di vita dell'impianto fotovoltaico in 30 anni sarebbero eguagliate in 14 mesi di produzione della stessa quantità di elettricità in un impianto a ciclo combinato alimentato a gas naturale.

---

<sup>3</sup> Calcolata alla luce della degradazione del pannello in 30 anni (tasso di degradazione annuale pari a 0,4%)

## Bibliografia

- Aleotti F. (2018). *Recupero di moduli fotovoltaici in silicio cristallino a fine vita: progetto "FRELP - Full Recovery End-of-Life Photovoltaic"*. Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare, Politecnico di Torino, Dicembre 2018, Relatore Filippo Spertino. Disponibile online: <https://webthesis.biblio.polito.it/secure/9277/1/tesi.pdf>
- Amo Installationskabel AB (2021). *Environmental product declaration of PVC insulated and PVC sheathed house wiring cable for open, fixed installation indoors and outdoors PR*. Disponibile online: <https://www.environdec.com/library/epd5121>
- Antonanzas J., Arbeloa-Ibero M., Quinn J.C. (2019). *Comparative life cycle assessment of fixed and single axis tracking systems for photovoltaics*. Journal of Cleaner Production 240, 118016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118016>
- Associazione Vivaisti Italiani (2022). *Scheda tecnica Olea Europaea*. <https://www.vivaistiitaliani.it/qualiviva/consultazione-shede-tecniche/item/1223-olea-europaea>
- Automobile Club d'Italia - ACI (2023). *Autoritratto 2022*. <https://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche/autoritratto.html>
- Bartocci P., Fantozzi P., Fantozzi F. (2017). *Environmental impact of Sagrantino and Grechetto grapes cultivation for wine and vinegar production in central Italy*. Journal of Cleaner Production: 569-580. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.090>
- Bosco S., Di Bene C., Galli M., Remorini D., Massai R., Bonari E. (2011). *Greenhouse gas emissions in the agricultural phase of wine production in the Maremma rural district in Tuscany, Italy*. Italian Journal of Agronomy: 93-100. doi:10.4081/ija.2011.e15
- Cellura M., Longo S., Mistretta, M. (2012). *LCA applicata alle tecnologie alimentate da energia solare: peculiarità e limiti metodologici*. VI Convegno della Rete Italiana LCA dal titolo "Dall'analisi del ciclo di vita all'impronta ambientale: percorsi ed esperienze a confronto", atti del convegno: pp. 15-22. Disponibile online: [https://iris.unipa.it/retrieve/handle/10447/64974/46303/Cellura\\_Longo\\_Mistretta\\_VIConvegnoReteLCA.pdf](https://iris.unipa.it/retrieve/handle/10447/64974/46303/Cellura_Longo_Mistretta_VIConvegnoReteLCA.pdf)
- Dodd N., Espinosa N., Van Tichelen P.P., Karolien S. A.M. (2020). *Preparatory study for solar photovoltaic modules, inverters and systems*. EUR 30468 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, Science for Policy, ISBN 978-92-76-26345-6, doi: 10.2760/852637, JRC122431.
- EMEP/EEA (2019). *Air pollutant emission inventory guidebook 2019 - Non-road mobile sources and machinery (section combustion, 1.4.A)*. Disponibile qui: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion>
- Falbo A., Biganzoli L., Forte F., Rigamonti L., Grosso M. (2015). *Il sistema di gestione dei RAEE in Lombardia. Parte II - Valutazione del ciclo di vita*. Ingegneria dell'Ambiente, Volume 2, numero 3: 27-43. DOI: [dx.doi.org/10.14672/ida.v2i3.277](http://dx.doi.org/10.14672/ida.v2i3.277)
- Falcone G., Strano A., Stillitano T., De Luca A.I., Iofrida N., Gulisano G. (2015). *Integrated Sustainability Appraisal of Wine-growing Management Systems through LCA and LCC Methodologies*. Chemical Engineering Transactions 223-228. DOI: 10.3303/CET1544038
- Frischknecht R., Stolz P., Krebs L., deWildScholten M., Sinha P., et al. (2020). *Life cycle inventories and life cycle assessments of photovoltaic systems 2020*. IEA, Photovoltaic Power Systems Programme, Report IEA-PVPS, Task 12. ISBN 978-3-907281-14-7. Disponibile online: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/12/IEA-PVPS-LCI-report-2020.pdf>
- Hischier R., Classen M., Lehmann M. and Scharnhorst W. (2007). *Life cycle inventories of Electric and Electronic Equipment: Production, Use and Disposal*. ecoinvent report No. 18., Dübendorf (CH)

HUAWEI (2021). *Product Carbon Footprint Report Solar Inverter SUN2000-20KTL-M0/SUN2000-20KTLM2*. Disponibile online: <https://www.ske-solar.com/wp-content/uploads/2021/01/Zertifikat-Product-Carbon-Footprint-Report-f%C3%BCr-Huawei-SUN2000-20KTL-M2-Wechselrichter.pdf>

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2021). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press. Disponibile online: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

Jungbluth N., Stucki M., and Frischknecht R., Buesser S. (2010). *Photovoltaics*.ecoinvent report No. 6-Part XII, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Uster (CH)

Latanussa C.E.L., Ardente F., Blengini G.A., Mancini L. (2016). *Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels*. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 156: 101-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.020>

LONGi Green Energy Technology Co (2022). *Environmental Product Declaration photovoltaic modules LR4-72HBD/ LR5-72HBD/ LR5-72HPH/ LR5-72HIBD/ LR5-72HIH/ LR5-54HPH/ LR5-54HIH/ LR5-54HIB*. Disponibile online: [https://www.epditaly.it/wp-content/uploads/2016/12/EPDITALY\\_MR-UL-Longi-Solar-1.pdf](https://www.epditaly.it/wp-content/uploads/2016/12/EPDITALY_MR-UL-Longi-Solar-1.pdf)

LS Cable Leading Solution (2023). *LS EHV Cable System 66-500kV XLPE Cable & Accessories*. Disponibile online: <https://www.powerandcables.com/wp-content/uploads/2017/12/LS-Cable-HV-EHV-XLPE-Cables-Joints-Systems-66kV-500kV.pdf>

Proietti S., Sdringola P., Desideri U., Zepparelli F., Brunori A., Ilarioni L., Nasini L., Regni L., Proietti P. (2014). *Carbon footprint of an olive tree grove*. *Applied Energy* 127: 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.019>

Riyadh Cables Group Company (2023). *HV & EHV Power Cables*. Disponibile online: <https://riyadh-cables.com/wp-content/uploads/2022/07/HV-EHV-Cables.pdf>

Rowe I.V., Rugani B., Benetto E. (2013). *Tapping carbon footprint variations in the European wine sector*. *Journal of Cleaner Production*, 43: 146-155. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.036>

The International EPD® System (2021). *General Programme Instructions for the International EPD® System, versione 4.0*. Disponibile online: <https://www.datocms-assets.com/37502/1617181375-general-programme-instructions-v-4.pdf>

Trina Solar Science & Technology (2020). *Environmental Product declaration of mono-crystalline silicon PV modules, model TSM-DEG15M.20(II), TSM-DEG15MC.20(II), TSM-DEG17M.20(II), TSM-DEG17MC.20(II)*. Disponibile online: [https://www.epditaly.it/en/wp-content/uploads/2016/12/Revised-2\\_MR-101.1\\_Trina-Solar\\_EPDM-DEG15M.20-II\\_TSM-DEG15MC.20-II\\_TSM-DEG17M.20-II\\_TSM-DEG17MC.20-II-PV-Double-Glass-Panels.pdf](https://www.epditaly.it/en/wp-content/uploads/2016/12/Revised-2_MR-101.1_Trina-Solar_EPDM-DEG15M.20-II_TSM-DEG15MC.20-II_TSM-DEG17M.20-II_TSM-DEG17MC.20-II-PV-Double-Glass-Panels.pdf)

Wambach K., Heath G., Wade A., Heath G., Libby C. (2017). *Life Cycle Inventory of Current Photovoltaic Module - Recycling Processes in Europe*. IEA PVPS Task12, Subtask 2, LCA. Disponibile online: [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/LCI\\_of\\_Current\\_European\\_PV\\_Recycling\\_WambachHeath\\_2017\\_by\\_Task\\_12.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/LCI_of_Current_European_PV_Recycling_WambachHeath_2017_by_Task_12.pdf)

## Appendice A - elenco dei principali dataset adottati per singola fase

**Tabella A.1.** Principali dati di inventario e dataset di ecoinvent versione 3.8 utilizzati per la modellizzazione del ciclo di vita di 1 modulo fotovoltaico.

Fase produttiva	Quantità	Dataset di ecoinvent versione 3.8
Produzione del modulo	3,11 m <sup>2</sup>	Photovoltaic panel, single-Si wafer {RoW}  production (modificato)
Trasporto per approvvigionamento	Quantità	Dataset di ecoinvent versione 3.8
Stabilimento produttivo - porto Shanghai	38,7 kg × 350 km	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro4 {RoW}  market for
Shanghai - Genova	38,7 kg × 15.775 km	Transport, freight, sea, container ship {GLO}  market for
Genova - Porto Torres	38,7 kg × 405 km	Transport, freight, sea, ferry {GLO}  market for transport
Porto Torres – Palmadula (cantiere)	38,7 kg × 20 km	Transport, freight, lorry >32 metric ton, mix Euro Italiano anno 2022 (ACI, 2023)
Fine vita	Quantità	Dataset di ecoinvent versione 3.8
Trasporto al primo impianto di trattamento	38,7 kg × 200 km	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER}  market for
Primo trattamento (consumi elettrici)	1,9 kWh	Electricity, medium voltage {IT}  market for
Primo trattamento (consumi termici)	13,5 MJ	Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland}  heat production, natural gas, at boiler modulating >100kW

**Tabella A.2.** Principali dati di inventario e dataset di ecoinvent 3.8 per la modellizzazione del ciclo di vita di 1 inverter.

Fase produttiva	Quantità	Dataset di ecoinvent versione 3.8
Produzione inverter	1 unità	Inverter, 500kW {RoW}  production (modificato come in Tabella B.1)
Trasporto per approvvigionamento	Quantità	Dataset di ecoinvent versione 3.8
Stabilimento produttivo - porto Shenzhen	112 kg × 70 km	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro4 {RoW}  market for
Shenzhen - Genova	112 kg × 14.430 km	Transport, freight, sea, container ship {GLO}  market for
Genova - Porto Torres	112 kg × 405 km	Transport, freight, sea, ferry {GLO}  market for transport
Porto Torres - Palmadula	112 kg × 20 km	Transport, freight, lorry >32 metric ton, mix Euro Italiano anno 2022 (ACI, 2023)
Fine vita	Quantità	Dataset di ecoinvent versione 3.8
Trasporto al primo impianto di trattamento	112 kg × 200 km	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER}  market for
Primo trattamento (consumi elettrici)	7,4 kWh	Electricity, medium voltage {IT}  market for
Incenerimento plastica rinforzata con fibra di vetro	4,2 kg	Vetro (60%): Waste glass {CH}  treatment of, municipal incineration Plastica (40%): Waste plastic, mixture {CH}  treatment of, municipal incineration
Incenerimento vernice	0,8 kg	Waste emulsion paint {CH}  treatment of, hazardous waste incineration
Incenerimento olio	32,7 kg	Waste mineral oil {CH}  treatment of, hazardous waste incineration
Incenerimento polietilene	0,8 kg	Waste polyethylene {CH}  treatment of, municipal incineration

**Tabella A.3.** Principali dati di inventario e dataset di ecoinvent versione 3.8 utilizzati per la modellizzazione del ciclo di vita di un sistema a inseguimento solare monoassiale PVH Monoline 2P.

Fase produttiva	Quantità	Dataset di ecoinvent versione 3.8
Produzione acciaio	1,17 t	Steel, low-alloyed {GLO}  market for
Laminazione a caldo	1,17 t	Hot rolling, steel {Europe without Austria}  hot rolling, steel*
Zincatura	89,2 m <sup>2</sup>	Zinc coat, pieces {RER}  zinc coating, pieces*
Trasporto per approvvigionamento	Quantità	Dataset di ecoinvent versione 3.8
Impianto produttivo - porto Valencia	1,17 t × 37 km	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro4 {RER}  market for
Valencia - Porto Torres	1,17 t × 850 km	Transport, freight, sea, ferry {GLO}  market for transport
Porto Torres - Palmadula	1,17 t × 20 km	Transport, freight, lorry >32 metric ton, mix Euro Italiano (anno 2022)
Fine vita	Quantità	Dataset di ecoinvent versione 3.8
Trasporto al primo impianto di trattamento	1,17 t × 50 km	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro6 {RER}  market for

\* Il dataset di riferimento è stato opportunamente modificato adottando il mix elettrico produttivo della Spagna, località ove sono prodotti gli inseguitori.

**Tabella A.4.** Principali dataset di ecoinvent versione 3.8 utilizzati per la modellizzazione della fase produttiva delle diverse tipologie di cavi utilizzate a Palmadula.

Fase produttiva	Dataset di ecoinvent versione 3.8
Produzione alluminio	Aluminium, primary, ingot {IAI Area, EU27 & EFTA}  market for
Lavorazione alluminio	Wire drawing, steel {RER}  processing (assunto come proxy in assenza di un modulo specifico per l'alluminio)
Produzione granuli HDPE	Polyethylene, high density, granulate {RER}  production
Estrusione HDPE	Extrusion, plastic pipes {RER}
Estrazione rame	Copper, cathode {GLO}  market for
Lavorazione rame	Wire drawing, copper {RER}  processing
Approvvigionamento piombo	Lead {GLO}  market for
Lavorazione piombo	Wire drawing, copper {RER}  processing (assunto come proxy in assenza di un modulo specifico per il piombo)
Realizzazione gomma	Synthetic rubber {GLO}  market for
Produzione PVC	Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO}  market for
Estrusione plastica	Extrusion, plastic pipes {RER}  extrusion, plastic pipes

## Appendice B - dettagli di modellizzazione del modello di inverter

**Tabella B.1.** Consumi di materie prime, imballaggi ed elettricità per la realizzazione di un inverter HUAWEI modello SUN2000-330KTL-H1 (112 kg, potenza 330 kW) in accordo con le indicazioni riportate nel report redatto da Jungbluth et al. (2010).

Richieste di materia prima, imballaggi ed elettricità	Valore/unità
Alluminio <sup>a</sup>	4,9 kg
Rame <sup>a</sup>	12,4 kg
Acciaio <sup>a</sup>	53,3 kg
Connettore <sup>a</sup>	1,8 kg
Poliammide rinforzata con fibra di vetro <sup>a</sup>	2,6 kg
Poliestere rinforzato con fibre di vetro <sup>a</sup>	1,6 kg
Polietilene ad alta densità <sup>a</sup>	0,8 kg
Vernice <sup>a</sup>	0,8 kg
Olio <sup>a</sup>	32,7 kg
Componenti elettroniche <sup>b</sup>	1,1 kg
Imballaggio in cartone <sup>c</sup>	13,5 kg
Imballaggio in plastica (film) <sup>d</sup>	0,54 kg
Consumo di elettricità (mix cinese)	3.021 kWh

<sup>a</sup> Il peso riportato nel dataset ecoinvent originale è stato riscalato sulla base del peso del modello di inverter che sarà adottato nell'impianto di Palmadula (112 kg anziché 2992 kg).

<sup>b</sup> Il peso delle componenti elettroniche è stato mantenuto inalterato su indicazione di Jungbluth et al. (2010).

<sup>c</sup> Peso dell'imballaggio in cartone adottato per il trasporto di un modello di inverter HUAWEI di simili caratteristiche (disponibile in questo [documento](#)).

<sup>d</sup> Calcolato a partire dal consumo di film per la realizzazione di un inverter da 500 kW e di peso 2.992 kg (1,6 kg/unità), dividendo tale valore per la radice cubica del rapporto tra i pesi dei due modelli di inverter (112 kg e 2.992 kg) come indicato in Jungbluth et al. (2010).

<sup>e</sup> Calcolato a partire dal consumo di energia elettrica per la realizzazione di un inverter da 500 kW (4.578 kWh/unità), dividendo tale valore per il rapporto tra le potenze dei due modelli di inverter (330 kW e 500 kW) come indicato in Jungbluth et al. (2010).

## Appendice C - dettagli sulla fase di cantierizzazione

**Tabella C.1.** Stima del consumo di diesel per i principali mezzi coinvolti in fase di cantierizzazione a Palmadula, coerentemente con il cronoprogramma delle attività.

Tipologia di macchina	Funzionamento (ore) <sup>A</sup>	Potenza (kW)	Consumo combustibile (g/kWh) <sup>B</sup>
Escavatori	7.600	300	250
Bobcat	8.680	200	250
Sollevatori tipo "merlo"	12.600	125	255
Betoniere	8.560	300	250
Rullo compressori	2.540	100	255

<sup>A</sup> Il valore di funzionamento (ore) riportato considera il fatto che sono presenti più mezzi d'opera, ognuno dei quali lavora due ore al giorno, per il periodo di tempo indicato nel cronoprogramma del cantiere.

<sup>B</sup> Tabella 3-6 del Guidebook EMEP/EEA (2019), valore classe Stage IV.