



Comune di Parma

STIIMA

Sistemi e Tecnologie Industriali Intelligenti
per il Manifatturiero Avanzato
Consiglio Nazionale delle Ricerche

Relazione di STIIMA-CNR

Analisi del Ciclo di Vita di servizi di produzione di energia elettrica da fotovoltaico

Analisi del ciclo di vita di moduli fotovoltaici e servizi per la
produzione di energia elettrica da fotovoltaico

Autori: Massimiliano Mariani, Francesco Caraceni, Carlo Brondi

Committente: Comune di Parma

Supervisore: Andrea Peri

Sommario

1.	Introduzione e informazioni generali riguardo lo studio.....	5
2.	Analisi del Ciclo di Vita	6
3.	Obiettivo dello studio	7
3.1	Applicazione dello studio.....	7
3.2	Pubblico.....	7
3.3	Definizioni.....	7
4.	Scopo dello studio	9
4.1	Caratteristiche del prodotto e servizio	11
4.2	Confini del Sistema.....	16
4.3	Criteri di Cut-off, Assunzioni, Metodi di allocazione e Categorie di Impatto	18
4.3.1	Criteri di Cut-off.....	18
4.3.2	Assunzioni per dichiarazioni ambientali di moduli fotovoltaici	18
4.3.3	Assunzioni per la modellazione della produzione di energia elettrica nel Comune di Parma	19
4.3.4	Assunzioni per pensilina fotovoltaica	19
4.3.5	Assunzioni per sistema ancorato a tetto spiovente.....	20
4.3.6	Assunzioni per sistema ancorato a tetto piano.....	20
4.3.7	Metodi di Allocazione.....	21
4.3.8	Categorie di impatto	21
5.	Inventario del Ciclo di Vita (LCI)	24
5.1	Procedura di raccolta dati.....	24
5.2	Pensilina Fotovoltaica.....	24
5.2.1	Input e assunzioni	25
5.2.1.1	Barre cave in alluminio.....	25
5.2.1.2	Componenti in acciaio	26
5.2.1.3	Zavorra in cemento	28
5.2.1.4	Cavi elettrici	29
5.2.1.5	Inverter	29

5.2.1.6	Packaging	30
5.2.1.7	Trasporto	32
5.2.1.8	Fine Vita	35
5.3	Sistema ancorato a tetto spiovente.....	40
5.3.1	Input e assunzioni	40
5.3.1.1	Barre cave di alluminio	40
5.3.1.2	Componenti in acciaio	42
5.3.1.3	Cavi elettrici.....	44
5.3.1.4	Inverter	45
5.3.1.5	Packaging	45
5.3.1.6	Trasporto	48
5.3.1.7	Fine vita	50
5.4	Sistema ancorato a tetto piano	55
5.4.1	Input e assunzioni	55
5.4.1.1	Barre cave di alluminio	55
5.4.1.2	Componenti in acciaio	57
5.4.1.3	Supporto in polietilene ad alta densità	59
5.4.1.4	Cavi elettrici.....	60
5.4.1.5	Inverter	60
5.4.1.6	Packaging	61
5.4.1.7	Trasporto	63
5.4.1.8	Fine vita	65
6.	Risultati	70
6.1	Metodologia per la valutazione dell'impatto ambientale	70
6.2	Raccolta dei risultati ottenuti	70
6.3	Profilo ambientale medio da dichiarazioni ambientali di prodotto.....	71
6.4	Materiale dello strato di assorbimento: silicio e tellururo di cadmio	72
6.5	Struttura della cella solare.....	76
6.5.1	Moduli fotovoltaici monofacciali.....	76

6.5.2	Moduli fotovoltaici bifacciali	81
6.6	Guadagno Bifacciale.....	85
6.7	Neutralità Carbonica	89
6.8	Fine Vita	91
6.9	Parametri di installazione	92
6.9.1	Inclinazione	93
6.9.2	Orientamento.....	95
6.10	Servizi di produzione di energia elettrica	97
6.10.1	Pensilina Fotovoltaica	97
6.10.2	Ancorato a tetto spiovente	100
6.10.3	Ancorato a tetto piano.....	103
7.	Discussione	105
7.1	Moduli fotovoltaici	106
7.1.1	Profilo ambientale medio di moduli fotovoltaici	106
7.1.2	Moduli fotovoltaici a film sottile	106
7.1.3	Fine Vita dei moduli fotovoltaici	107
7.1.4	Confronto tra moduli monofacciali e bifacciali e guadagno bifacciale.....	107
7.1.5	Tempo di pareggiamento.....	108
7.2	Servizi di produzione di energia elettrica da fotovoltaico	108
8.	Conclusioni.....	110
9.	Indicazioni operative per l'installazione di moduli fotovoltaici	112
9.1	Indicazioni per installazioni residenziali	112
9.1.1	Indicazioni per installazioni su copertura spiovente	112
9.1.2	Indicazioni per installazioni su copertura piane	114
9.2	Indicazioni per installazioni pensiline fotovoltaiche	115
9.3	Indicazioni per pareri riguardo installazioni agrivoltaico e campi fotovoltaici	116
10.	Riferimenti.....	118



c.9337.Comune di Parma - Prot. 08/04/2025.0097815.E Si attesta che la presente copia digitale è conforme all'originale digitale ai sensi del l art. 23-bis del D.Lgs. n. 82/2005. Il corrispondente documento informatico originale è conservato negli archivi di Comune di Parma

1. Introduzione e informazioni generali riguardo lo studio

La seguente relazione fornisce una descrizione dettagliata delle attività svolte nell'ambito del Sottobiettivo 2 del contratto di Ricerca stipulato tra il Comune di Parma e l'Istituto di Sistemi e Tecnologie Industriali Intelligenti per il Manifatturiero Avanzato del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-STIIMA) in data 17/11/2023. L'attività svolta si concentra sullo studio ed analisi del ciclo di vita secondo la norma ISO 14040 e 14044 di moduli fotovoltaici e servizi per la produzione di energia elettrica da fotovoltaico. In questo studio si sono confrontati ed analizzati i profili ambientali di moduli fotovoltaici con strutture e caratteristiche diverse, descritti in 41 studi certificati da programmi di ecolabel di tipo III facenti riferimento alla stessa Regola di Categoria di Prodotto, NPCR 029 Parte B. Un programma di ecolabel di tipo III, per come definito dall'Organizzazione Internazionale per le Standardizzazioni (ISO) nella norma ISO 14025, è un'iniziativa volontaria, gestita da enti operatori pubblici o privati, volta alla produzione di dichiarazioni ambientali basate su regole condivise, fornendo informazioni riguardo gli aspetti ambientali di prodotti, attività o servizi sulla base di dati ambientali quantificati e verificati da terze parti usando parametri predeterminati. Le Regole di Categoria di Prodotto o Product Category Rules (PCR) sono linee guida per la realizzazione di uno studio LCA per un gruppo simile di prodotti, che assicurano la coerenza e confrontabilità dell'analisi definendo rigorosamente le modalità di raccolta ed elaborazione dei dati e valutazione degli impatti ambientali. Sono state evidenziate le criticità ambientali per le diverse caratteristiche dei moduli fotovoltaici quali: materiali responsabile dell'assorbimento della radiazione elettromagnetica, struttura della cella solare e tipologia di modulo monofacciale oppure bifacciale. Per ogni struttura e tipologia di modulo fotovoltaico è stato anche valutato il tempo di raggiungimento della Neutralità Carbonica, modellando la produzione energetica secondo parametri localizzati sul Comune di Parma. Inoltre, sono stati modellati ed analizzati tre sistemi per la produzione di energia elettrica da fotovoltaico adatti all'installazione in un contesto urbano e di interesse per il Committente: 1) pensiline fotovoltaiche, 2) sistemi ancorati a tetto spiovente e 3) sistemi ancorati a tetto piano. Il profilo ambientale e le criticità relative a questi sistemi sono stati individuati e analizzati.

2. Analisi del Ciclo di Vita

L'Analisi del Ciclo di Vita è un metodo che permette la valutazione dell'impatto ambientale potenziale relativo all'intero ciclo di vita del prodotto, servizio o attività considerato ed è definito dalle norme UNI EN ISO 14040 e UNI EN ISO 14044, nelle quali sono definiti le linee guida per il corretto svolgimento dello studio.

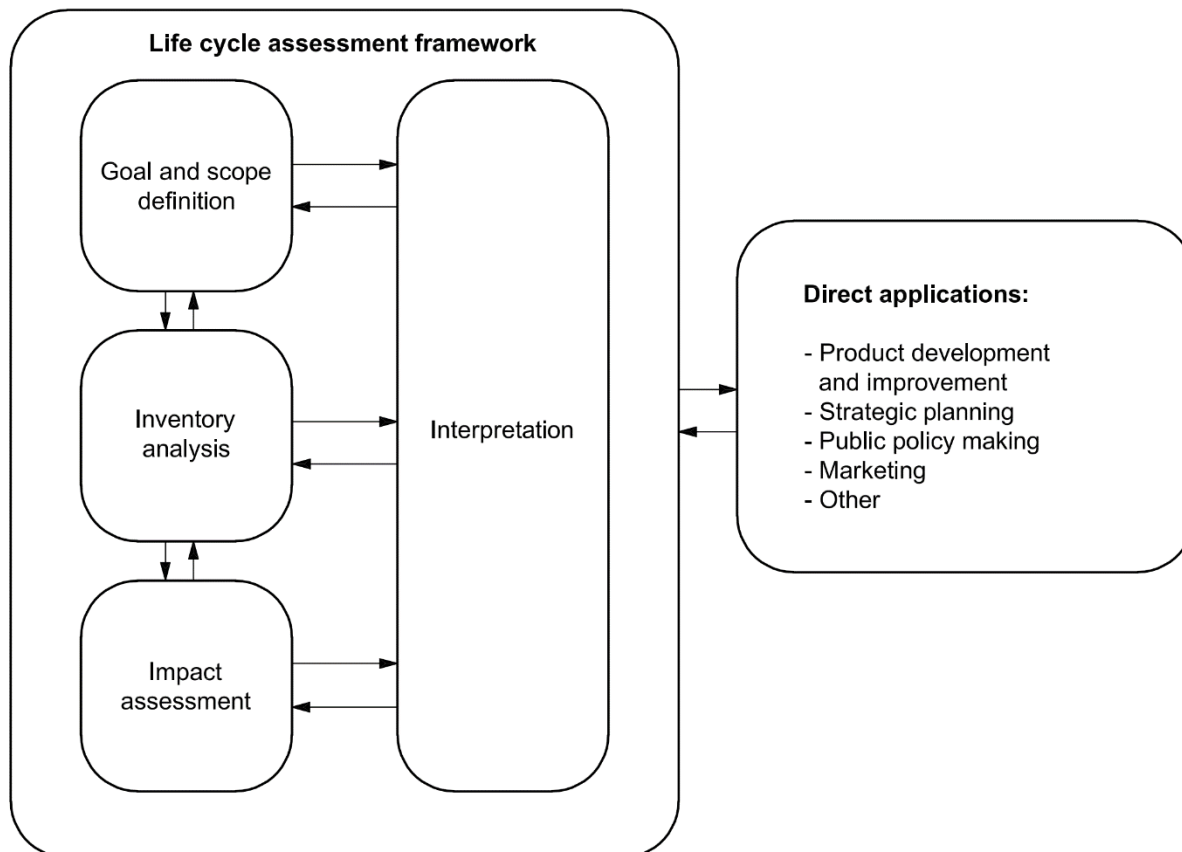


Figura 1 Fasi dell'Analisi del Ciclo di Vita.

Le quattro fasi dell'Analisi del Ciclo di Vita sono rappresentate in Figura 1. La prima fase è la definizione dell'obiettivo e scopo dello studio, seguita dall'analisi dell'inventario (LCI) e la fase di Valutazione degli Impatti ambientali (LCIA), e infine dall'interpretazione dello studio.

3. Obiettivo dello studio

L'obiettivo dello studio è di fornire al Committente un solido riferimento indicativo dell'impatto ambientale legato all'intero ciclo di vita di moduli fotovoltaici e servizi di produzione di energia elettrica da fotovoltaico al fine di supportare con evidenze scientifiche il percorso di transizione energetica intrapreso dal Comune di Parma in ottica "European Green Deal" e "Climate Neutral and Smart Cities". Inoltre, questo studio si colloca nel più ampio progetto di promuovere la pratica di Life Cycle Assessment sul territorio comunale di Parma.

3.1 Applicazione dello studio

L'applicazione preventivata dello studio consiste nel permettere al Comune di Parma di fornire indicazioni e linee guida all'interno di bandi e atti amministrativi riguardo l'installazione di impianti di produzione di energia elettrica da fotovoltaico supportate da evidenze scientifiche, oltre che il rilascio di pareri per interventi privati.

3.2 Pubblico

I destinatari attesi sono LCA Analyst per la ripetibilità del modello e responsabili decisionali del Comune di Parma per le conclusioni generali. Non sono previste restrizioni riguardo al pubblico a cui è rivolto questo studio.

3.3 Definizioni

Di seguito si fornisce una definizione dei termini non esplicitamente definiti nel corpo della relazione:

- **Profilo ambientale** – Il profilo ambientale di un prodotto, servizio o attività è l'insieme dei risultati di uno studio LCA e descrive dettagliatamente le caratteristiche e performance ambientali sulla base della valutazione dei potenziali impatti ambientali espressi secondo predefiniti indicatori d'impatto ambientale riconducibili ad altrettante categorie d'impatto ambientale
- **Indicatore d'impatto ambientale** – Un indicatore d'impatto ambientale è una rappresentazione quantitativa di una categoria d'impatto ambientale.
- **Categoria d'impatto ambientale** – Una categoria d'impatto ambientale rappresenta un problema ambientale globale di rilievo alla quale è possibile attribuire i risultati di un'analisi dell'inventario del ciclo di vita, secondo fattori di caratterizzazione derivanti da modelli che descrivono i relativi meccanismi ambientali.
- **Unità funzionale** – L'unità funzionale è l'unità di riferimento quantitativa dello studio LCA, la quale definisce univocamente la funzione del prodotto, servizio o attività analizzata secondo caratteristiche rilevanti, come quantità prodotta (es. 1 kg di prodotto), servizio erogato (es. 1

tonnellata di beni trasportata per 100 km) o durata dell'attività (es. illuminazione di una stanza per 1000 ore).

- Confini del sistema - I confini del sistema definiscono univocamente quali processi unitari fanno parte del sistema sotto esame sulla base di un insieme specifico di criteri.
- Cradle-to grave – Questo termine, dalla culla alla tomba, definisce una tipologia di sistema che include tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto, servizio o attività, dall'acquisizione delle materie prime fino allo smaltimento finale.
- Dichiarazione Ambientale di Prodotto o Environmental Product Declaration (EPD) – Una dichiarazione ambientale di prodotto è un documento che dichiara gli aspetti ambientali di un prodotto o servizio fornendo dati ambientali quantitativi soggetti a verifica da terze parti ed espressi secondo parametri predeterminati e condivisi.
- Agenzia Internazionale dell'Energia o International Energy Agency (IEA) – L'IEA è un'organizzazione internazionale e intergovernativa con lo scopo di coordinare gli sforzi per le politiche energetiche e per lo sviluppo di fonti alternative di energia.
- Inseguitori solari o tracker solari – I tracker solari sono dispositivi ausiliari per l'orientamento automatico ed intelligente dei moduli fotovoltaici rispetto alla posizione del sole, allo scopo di massimizzare la produzione di energia elettrica.
- Drogaggio – Il drogaggio di un semiconduttore consiste nell'introduzione controllata di impurità all'interno del reticolo cristallino per modularne le proprietà elettriche, ottiche o strutturali. Nell'ambito della produzione di moduli fotovoltaici si distinguono celle solari con wafer di silicio tipo n, ovvero drogate con atomi di fosforo, o tipo p, contenenti atomi di boro.

4. Scopo dello studio

Lo scopo dello studio è di fornire un'evidenza quantitativa dell'impatto ambientale secondo le norme ISO 14040 e 14044 di moduli fotovoltaici e servizi di produzione di energia elettrica da fotovoltaico. Il profilo ambientale di diverse strutture e tipologie di moduli fotovoltaici è stato valutato come media dei risultati di studi certificati da programmi di ecolabel di tipo III, facenti riferimento alla stessa Regola di Categoria di Prodotto, "NPCR029 Parte B per moduli fotovoltaici usati nel settore edilizio e delle costruzioni, inclusi la produzione di celle solari, wafer, lingotti, silicio di livello solare (solar grade silicon), substrati solari, rivestimenti solari e altri materiali semiconduttori di grado solare". I risultati di tale studio cradle-to-grave sono suddivisi per materiale semiconduttore che costituisce lo strato responsabile della generazione di portatori di carica all'interno della cella solare, struttura delle celle solari che compongono il modulo fotovoltaico e tipologia monofacciale o bifacciale. Il profilo ambientale è descritto per l'unità funzionale di 1 Wp di modulo fotovoltaico prodotto e 1 kWh di energia elettrica prodotta un modulo fotovoltaico secondo l'Equazione 1, la quale definisce l'energia elettrica prodotta in un determinato anno di servizio.

$$1) \text{ Eyear } i = I_{sun} \times S1kWp \times Eff_{panel} \times PR \times D_{panel} \times (1 + b)$$

dove $Eyear_i$ è l'energia elettrica prodotta nell'anno i , I_{sun} è l'irradiazione solare incidente sul modulo fotovoltaico simulata secondo i parametri standard riportati in Tabella 2 o per come riportati nella descrizione dei risultati, $S1kWp$ è la superficie di modulo in m^2 necessari ad avere una potenza nominale installata pari a 1 kWp, Eff_{panel} è l'efficienza del modulo fotovoltaico dichiarata dal produttore, PR è il fattore di conversione della performance del modulo considerato fisso e pari a 0.85, D_{panel} è la degradazione annua del modulo dichiarata dal produttore e b è il guadagno bifacciale, ovvero la percentuale di energia elettrica aggiuntiva prodotta dalla faccia posteriore.

Per ciascuna struttura e tipologia di modulo considerato è stato valutato il tempo di raggiungimento della Neutralità Carbonica, evidenziando diversi scenari di guadagno bifacciale. Infine sono stati modellati 3 servizi di produzione di energia elettrica da fotovoltaico, definendo per ciascuno il profilo ambientale usando dati generici presenti nel database *Ecoinvent* 3.9. I servizi modellati sono descritti come:

1. Pensilina Fotovoltaica in alluminio con zavorra in cemento;
2. Sistema ancorato a tetto spiovente con struttura in alluminio;
3. Sistema ancorato a tetto piano con struttura in alluminio.

Tabella 1 Dichiarazioni ambientali di prodotto considerate nello studio.

n°	Dichiarazione Ambientale di Prodotto (n° Dichiarazione)	Monofacciale/ Bifacciale	Struttura
1	LONGI Monocrystalline Topcon Module Lr5-72hgd (NEPD-6162-5427-EN)	Bifacciale	HPDC
2	Mono-Crystalline Double Glass, P-Type (NEPD-5713-4981-EN)	Bifacciale	PERC
3	Mono-Crystalline Double Glass, N-Type (NEPD-5714-4981-EN)	Bifacciale	TOPCon
4	Mono-Crystalline Single Glass, P-Type (NEPD-5712-4981-EN)	Monofacciale	PERC
5	132 High Performance Monocrystalline Hjt Module (NEPD-5523-4819-EN)	Bifacciale	HJT
6	Mono-Crystalline Double Glass, N-Type, Solar Photovoltaic Modules (NEPD-4908-4258-EN)	Bifacciale	TOPCon
7	132 High Performance Monocrystalline Perc Module (NEPD-4464-3725-EN)	Monofacciale	PERC
8	132 High Performance Monocrystalline Perc Module (NEPD-4464-3725-EN)	Bifacciale	PERC
9	Mono-Crystalline Single Glass, P-Type, Solar Photovoltaic Modules (NEPD-4907-4258-EN)	Monofacciale	PERC
10	Mono-Crystalline Double Glass, P-Type, Solar Photovoltaic Modules (NEPD-4909-4258-EN)	Bifacciale	PERC
11	Series 6 Photovoltaic Module (NEPD-2993-1671-EN)	Monofacciale	CdTe
12	First Solar Series 7 Photovoltaic Module (NEPD-5039-4377-EN)	Monofacciale	CdTe
13	Astronergy Photovoltaic Modules Chsm72m-Hc (NEPD-8-6-MRA)	Monofacciale	PERC
14	Astronergy Photovoltaic Modules CHSM54M-HC And CHSM54M(BL)-HC (S-P-11631)	Monofacciale	PERC
15	Astronergy Photovoltaic Modules Chsm72m(Dg)/F-Bh (S-P11630)	Bifacciale	PERC
16	Alpha Pure-Rx (NEPD-8-6-MRA)	Monofacciale	HJT
17	Alpha Pure-R (NEPD-8-6-MRA)	Monofacciale	HJT
18	N-Peak 2 (NEPD-3422-2033-EN)	Bifacciale	PERC
19	Twinpeak 4 (NEPD-3421-2033-EN)	Monofacciale	PERC
20	Alpha Pure (NEPD-3420-2033-EN)	Monofacciale	HJT
21	Astronergy Monocrystalline Photovoltaic Modules (NEPD-6420-5635-EN)	Monofacciale	TOPCon
22	P6 Com Xs (NEPD-6493-5754-EN)	Monofacciale	PERC
23	P7 Com S (NEPD-6495-5754-EN)	Bifacciale	TOPCon
24	P7 Res Black (NEPD-6494-5754-EN)	Bifacciale	TOPCon
25	Longi Solar Photovoltaic Module (S-P-06192)	Monofacciale	HPBC
26	Jolywood N-Type Bifacial Double Glass Photovoltaic Modules (S-P-03811)	Bifacciale	TOPCon

27	Longi Solar Monocrystalline Silicon Photovoltaic Modules (S-P-09079)	Monofacciale	PERC
28	Mono-Crystalline Double Glass, N-Type, Solar Photovoltaic Modules (NEPD-6586-5846-EN)	Bifacciale	ABC
29	Mono-Crystalline Single Glass, N-Type, Solar Photovoltaic Modules (NEPD-6585-5846-EN)	Monofacciale	ABC
30	Mono-Crystalline Double Glass, N-Type, Solar Photovoltaic Modules (NEPD-6642-5880-EN)	Bifacciale	TOPCon
31	Mono-Crystalline Single Glass, N-Type, Solar Photovoltaic Modules (NEPD-6641-5880-EN)	Monofacciale	TOPCon
32	HUASUN 182mm MONOCRYSTALLINE HJT MODULE (NEPD-6764-6082-EN)	Bifacciale	HJT
33	HUASUN 210mm MONOCRYSTALLINE HJT MODULE (NEPD-6763-6082-EN)	Bifacciale	HJT
34	Photovoltaic Modules QN-Xxxht-108-16BB QN-Xxxhd-108-16BB QN-Xxxhd-144-16BB (NEPD-6698-5940-EN)	Monofacciale	TOPCon
35	Mono-Crystalline Double Glass, N-Type, Solar Photovoltaic Modules (NEPD-6730-6052-EN)	Bifacciale	TOPCon
36	Mono-Crystalline Double Glass, P-Type, Solar Photovoltaic Modules (NEPD-6729-6052-EN)	Bifacciale	PERC
37	Mono-Crystalline Single Glass, P-Type, Solar Photovoltaic Modules (NEPD-6728-6052-EN)	Monofacciale	PERC
38	Monofacial RT 54-60 Cells Modules (NEPD-6911-6301-EN)	Monofacciale	TOPCon
39	Bifacial RT 54-60 Cells Modules (NEPD-6912-6301-EN)	Bifacciale	TOPCon
40	Photovoltaic Modules: NEG18R.20, NEG18R.28 (NEPD-7032-6426-EN)	Monofacciale	TOPCon
41	Photovoltaic Modules: NEG9R.25, NEG9R.28, NEG9RC.27 (NEPD-7031-6426-EN)	Monofacciale	TOPCon

Tabella 2 Parametri di modellazione per la produzione di energia elettrica.

Latitudine/Longitudine (°)	44.837, 10.338
Database	PVGIS-SARAH2
Inclinazione	30°
Azimut	0°
Irraggiamento	Global Irradiance on a fixed plane W/m ²
Tempo di servizio (anni)	25

4.1 Caratteristiche del prodotto e servizio

Una singola dichiarazione ambientale può rappresentare ed essere valida per diversi modelli di moduli fotovoltaici che si differenziano per dimensioni, numero di celle e potenza nominale, se la variazione tra i risultati è inferiore al 10%. Pertanto, per ciascuna dichiarazione è stato identificato un modello rappresentativo dei risultati riportati, descrivendolo secondo le seguenti caratteristiche tecniche:

• Materiale semiconduttore
• Tipologia monofacciale o bifacciale
• Struttura della cella solare
• Potenza Nominale valutata in condizioni standard (1000 W/m ² , AM 1.5, 25°C)
• Area (m ²)
• Tempo di servizio (anni)
• Degradazione dopo il primo anno (%)
• Degradazione annuale per gli anni successivi (%)
• Efficienza del modulo (%)

In particolare, i risultati riportati nello studio descrivono il profilo ambientale medio dei moduli fotovoltaici distinguendoli per materiale semiconduttore, tipologia e struttura della cella solare. L'impatto ambientale in questa fase è stato calcolato per l'unità funzionale di 1 Wp di modulo fotovoltaico prodotto e 1 kWh di energia elettrica prodotta un modulo fotovoltaico prodotto secondo i parametri di modellazione espressi nella Tabella 2. Per il materiale semiconduttore si sono distinti i seguenti materiali:

1. Silicio cristallino, senza distinzione per drogaggio di tipo p o n;
2. Tellururo di Cadmio

Si è anche evidenziato il contributo all'impatto ambientale per ogni singola categoria dovuto alla fase di estrazione, produzione e assemblaggi e alla fase di fine-vita. Per i moduli monofacciali si sono distinti i profili ambientali per 6 strutture di celle solari:

1. PERC - Passivated Emitter and Rear Contact – Passivazione dell'Emettitore e Contatto posteriore
2. HJT – Eterogiunzione
3. CdTe - Film Sottile di Tellururo di Cadmio
4. TOPCon – Tunnel Oxide Passivated Contact – Contatto Passivato da Tunnel di SiO₂
5. HPBC – Hybrid Passivated Back Contact – Passivazione Ibrida del Contatto Posteriore
6. ABC - All Back Contact – A Contatto Posteriore

Per modulo monofacciale si intende un modulo fotovoltaico capace di catturare la luce solare incidente unicamente da un lato e convertirla in energia, come rappresentato nello schema in Figura 2A.

Per i moduli fotovoltaici bifacciali si sono invece distinti 5 strutture:

1. PERC - Passivated Emitter and Rear Contact
2. HJT – Eterogiunzione
3. TOPCon – Tunnel Oxide Passivated Contact
4. HPDC –High Performance and Hybrid Passivated Dual-Junction Cell – Cella a Doppia Giunzione ad Alte Performance e con Passivazione Ibrida

5. ABC - All Back Contact

Si fornisce di seguito una breve descrizione per ciascuna struttura considerata in questo studio.

- La struttura tipo PERC si caratterizza per l'aggiunta di uno strato di passivazione sulla parte posteriore della cella, che riduce la ricombinazione degli elettroni e migliora l'efficienza, mantenendo una struttura in silicio con contatti metallici sia sulla parte anteriore che posteriore per ottimizzare la raccolta di portatori di carica.
- Per struttura ad eterogiunzione di silicio si considera una giunzione tra uno strato di silicio cristallino e strati ultrasottili di silicio amorfo depositati su entrambi i lati, creando una giunzione ibrida che migliora l'efficienza grazie alla ridotta ricombinazione elettronica e alla migliore gestione delle perdite ottiche ed elettriche.
- Le strutture a film sottile si distinguono per l'utilizzo di uno strato molto sottile di materiale semiconduttore, solitamente composto da silicio amorfo, tellururo di cadmio (CdTe), o diseleniuro di rame, indio e gallio (CIGS). La principale caratteristica di questi moduli rispetto alle tradizionali celle solari a base di silicio cristallino è lo spessore estremamente ridotto del materiale attivo.
- La struttura della cella solare di tipo TOPCon integra un sottile strato di ossido di silicio e un contatto passivato in silicio policristallino sulla parte posteriore dello strato di silicio monocristallino, migliorando l'efficienza grazie alla riduzione delle perdite dovute alla ricombinazione e all'ottimizzazione del trasporto dei portatori di carica.
- La struttura della cella solare di tipo HPBC elimina i contatti anteriori spostandoli completamente sul retro e combinando strati di passivazione avanzata massimizza l'assorbimento della luce e riduce le perdite ottiche ed elettroniche, aumentando così l'efficienza complessiva.
- Le celle solari HPBC rappresentano una tecnologia avanzata che ottimizza la raccolta di luce solare e riduce le perdite di energia attraverso una disposizione dei contatti elettrici sul retro della cella. Pur essendo più complesse e costose da produrre rispetto alle celle solari convenzionali, offrono elevate prestazioni in termini di efficienza e durata.
- La struttura della cella solare di tipo HPDC è caratterizzata da un approccio di passivazione ibrida, ottimizzando il processo di deposizione dei film. Questa struttura presenta una riduzione della ricombinazione di portatori di carica maggiore affidabilità e una elevata efficienza.
- La cella solare di tipo ABC si distingue per la disposizione dei contatti elettrici, posizionati sul retro del modulo, eliminando le griglie frontali. Sono basate sulla tecnologia a contatto posteriore

interdigitato (IBC) e offrono una potenziale riduzione dei costi grazie all'uso limitato di materiali costosi come l'argento.

Al contrario dei moduli monofacciali, quelli bifacciali sono in grado di sfruttare anche la luce riflessa sulla parte posteriore, Figura 2B.

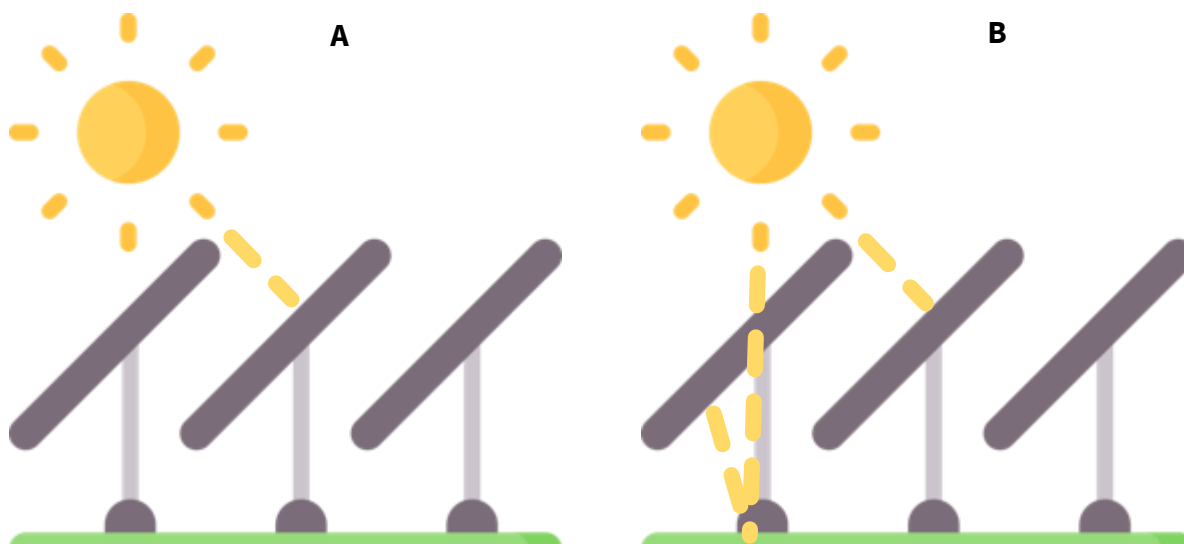


Figura 2 Schema di assorbimento della luce solare da moduli fotovoltaici monofacciali (A) e bifacciali (B)

La struttura di una cella solare si riferisce all'insieme degli strati e degli elementi che la compongono. Le celle solari sono la componente fondamentale dei pannelli solari e in generale, la loro struttura è composta dai seguenti strati principali:

- **Strato antiriflesso:** Uno strato sottile posta sulla parte superiore della cella solare, spesso costituita da materiali come il silicio o ossidi di metallo, che riduce la quantità di luce riflessa, permettendo al massimo della luce solare di entrare nella cella.
- **Strato di assorbimento:** La maggior parte delle celle solari moderne è costituita da silicio (in forma monocristallina, policristallina o amorfa), o un altro materiale semiconduttore che assorbe la luce solare e la converte in elettricità.
- **Contatti elettrici:** Componenti metallici, generalmente posti sulla parte superiore e inferiore, usati per raccogliere gli elettroni e convogliarli in un circuito elettrico.
- **Strato protettivo:** Un supporto di materiale che stabilizza e protegge la cella, può essere costituito da materiali trasparenti come il vetro o da un substrato di plastica, che permette alla luce di penetrare facilmente nel silicio.

Gli scenari valutati per il guadagno bifacciale rispetto all'energia elettrica prodotta dalla faccia direttamente esposta alla radiazione elettromagnetica solare sono:

1. Nessun guadagno

2. Guadagno del 10%
3. Guadagno del 20%
4. Guadagno del 30%

I tre servizi di produzione di energia elettrica da fotovoltaico, pensilina fotovoltaica, sistema ancorato a tetto inclinato e piano, sono stati modellati separati in due sottosistemi: sistema fotovoltaico, e struttura di supporto e componenti elettrici ed elettronici. Per semplicità nella modellazione dei sistemi è stato assunto per le tre tipologie di servizio lo stesso numero di moduli fotovoltaici installati e la stessa area occupata. Il sistema fotovoltaico è composto da 18 moduli fotovoltaici monofacciali, le cui caratteristiche tecniche sono date dalle media dei valori dei moduli fotovoltaici monofacciali descritti dalle dichiarazioni ambientali di prodotto considerate. In Tabella 3 sono, pertanto, riportate le caratteristiche tecniche medie attribuite al modulo fotovoltaico monofacciale montato sui servizi di produzione di energia elettrica da fotovoltaico, in particolare si riporta:

- Potenza nominale - La potenza nominale in Wp, ovvero la potenza elettrica che il modulo è in grado di generare in condizioni standard di test STC (temperatura 25 °C, irraggiamento solare 1000 W/m², AM1.5);
- Area - Le dimensioni in m²;
- Tempo di servizio o Reference Service Lifetime (RSL) - Il tempo stimato di operatività del modulo fotovoltaico mantenendo una potenza nominale superiore all'80% di quella iniziale a seguito della degradazione annuale delle performance;
- Degradazione 1° anno - Degradazione percentuale delle performance di etichetta nel primo annuo di servizio;
- Degradazione Annuale - Degradazione percentuale annuale delle performance di etichetta per gli anni di servizio successivi al primo;
- Efficienza - La misura di quanto efficacemente il modulo fotovoltaico converte l'energia solare incidente in energia elettrica.

Tabella 3 Caratteristiche tecniche del modulo fotovoltaico monofacciale considerato per la modellazione dei servizi di produzione di energia elettrica da fotovoltaico.

Potenza nominale (Wp)	502
Area (m ²)	2.31
Tempo di servizio (anni)	25
Degradazione 1° anno (%)	1.29
Degradazione annuale (%)	0.43
Efficienza (%)	21.79

Gli elementi che costituiscono i sistemi di produzione di energia elettrica da fotovoltaico sono stati modellati sulla base di linee guida riportate dall'IEA per la fase di Inventario del Ciclo di Vita. In particolare, nel caso della pensilina fotovoltaica, la struttura di supporto composta da barre di alluminio e zavorre di cemento è stata modellata secondo dimensioni, materiali e quantità presenti in cataloghi online a seguito di una ricerca di settore. I flussi relativi ai componenti elettrici ed elettronici, packaging e trasporti sono stati modellati sulla base di dati unitari presenti in letteratura, scalati per lo studio in questione. In Tabella 4 sono riportate le specifiche tecniche di modellazione dei servizi di produzione di energia elettrica da fotovoltaico.

Tabella 4 Caratteristiche tecniche e specifiche dei servizi di produzione di energia elettrica.

A. Pensilina Fotovoltaica	
Area occupata (m ²)	41.96
Numero di moduli fotovoltaici	18
Potenza nominale installata (kWp)	9.04
A.1 Componenti della struttura di supporto	
Barre tubolari in alluminio	544.4 kg
Zavorra in cemento	1200 kg
Invertitore DC/AC 10 kWp	1
Cavi elettrici	96.5 m
B. Sistema ancorato a tetto inclinato	
Area occupata (m ²)	41.9
Numero di moduli fotovoltaici	18
Potenza nominale installata (kWp)	9.04
B.1 Componenti della struttura di supporto	
Barre tubolari in alluminio	181.8
Elementi in acciaio bassolegato	62.9 kg
Invertitore DC/AC 10 kWp	1
Cavi elettrici	96.5 m
C. Sistema ancorato a tetto piano	
Area occupata (m ²)	41.9
Numero di moduli fotovoltaici	18
Potenza nominale installata (kWp)	9.04
C.1 Componenti della struttura di supporto	
Barre tubolari in alluminio	105.6 kg
Elementi in acciaio bassolegato	11.2 kg
Appoggio HDPE	80.4 kg
Invertitore DC/AC 10 kWp	1
Cavi elettrici	96.5 m

4.2 Confini del Sistema

Per le dichiarazioni ambientali i confini del sistema sono definiti dalla relativa Regola di Categoria di Prodotto NPCR029 parte B, la quale definisce univocamente le modalità con cui deve essere condotta

l'analisi del ciclo di vita per moduli fotovoltaici e richiede la quantificazione dell'impatto ambientale per i seguenti moduli del Ciclo di Vita:

- A1-A3: Modulo del prodotto, il quale include:
 - I. A1: Estrazione delle materie prime e lavorazione, lavorazione dei materiali secondari in input (es. processi di riciclo);
 - II. A2: Trasporto al produttore;
 - III. A3: Manifattura, inclusa la fornitura di tutti i materiali, prodotti ed energia, compreso il trattamento fino a fine di stato di rifiuto o smaltimento dei residui prodotti durante questo modulo;
- A4-A5: Modulo del processo di assemblaggio, il quale include:
 - I. A4: Trasporto al sito di installazione;
 - II. A5: Installazione;
- C1-C4: Modulo di fine vita, il quale include:
 - I. C1: Disassemblaggio e demolizione;
 - II. C2: Trasporto al sito di trattamento;
 - III. C3: Trattamento dei rifiuti per riuso, recupero e/o riciclo;
 - IV. C4: Smaltimento;
- D: Benefici e carichi oltre il confine di sistema;

All'interno di questo studio l'analisi è stata ristretta ad una valutazione dalla culla alla tomba (cradle-to-grave), escludendo il modulo B, i cui dati non sono richiesti nelle dichiarazioni ambientali, e il modulo D, il quale quantifica i benefici dovuti al recupero di materie prime a seguito di trattamenti a fine vita. Il recupero di materie prime, tra cui vetro, alluminio, metalli preziosi e materiali polimerici, dipende dalla tecnologia impiegata per il trattamento a fine vita e, pertanto, introdurrebbe un ulteriore grado di assunzioni nel confronto tra moduli fotovoltaici. La fase di vita B, esclusa in questo studio e non richiesta per le dichiarazioni ambientali di prodotto di moduli fotovoltaici secondo la NPCR 029:B, descrive l'impatto ambientale dei flussi relativi alle seguenti attività:

- I. B1: Utilizzo del prodotto durante il tempo di servizio stimato;
- II. B2: Manutenzione del prodotto per garantirne il corretto funzionamento e mantenimento nel tempo;
- III. B3: Riparazione del prodotto nel caso di cessazione delle sue funzioni, definite dall'unità funzionale, o degradazione delle performance al di sotto di sogli minime prestabilite;
- IV. B4: Rimpiazzo del prodotto nel caso di impossibilità di ripararlo o restaurarlo;

- V. B5: Restauro del prodotto alle condizioni di performance iniziali, mitigando l'azione di degradazione nel tempo;
- VI. B6: Consumi di energia per garantire l'utilizzo del prodotto;
- VII. B7: Consumi d'acqua per garantire l'utilizzo del prodotto;

I moduli del Ciclo di Vita considerati, Figura 3, sono pertanto:

- A1-A3: Modulo del prodotto;
- A4-A5: Modulo del processo di assemblaggio;
- C1-C4: Modulo del fine vita;

Product and assembly					Use							End of life				Benefits beyond system boundaries
Raw materials	Transport	Manufacturing	Transport	Assembly	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	De-contruction	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse - Recovery- Recycling
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗

Figura 3 Moduli del Ciclo di Vita considerati nello studio dalla culla alla tomba (cradle-to-grave).

4.3 Criteri di Cut-off, Assunzioni, Metodi di allocazione e Categorie di Impatto

4.3.1 Criteri di Cut-off

Per come delineato dalla regola di Categoria di Prodotto NPCR029:B, i criteri di cut-off che determinano l'esclusione di input o output dell'analisi sono definiti dalla norma BS EN 15804:2012 + A2:2019) con raccomandazioni aggiuntive definite da General Programme Instructions di EPD Norway. I criteri di cut-off in un LCA stabiliscono i limiti per l'inclusione dei dati nell'analisi, al fine di ridurre la complessità e mantenere la coerenza dell'analisi, pur considerando tutti gli aspetti significativi. Questi criteri sono necessari per evitare che l'analisi diventi troppo complessa o invada dettagli marginali che non influenzano in modo significativo i risultati.

4.3.2 Assunzioni per dichiarazioni ambientali di moduli fotovoltaici

Le dichiarazioni ambientali di prodotto elencate in Tabella 1, sono in corso di validità nel momento in cui è stato eseguito lo studio e pertanto sono ritenute confrontabili tra loro. Per definire il profilo ambientale dei moduli fotovoltaici a base di silicio, sono state considerate tutte le dichiarazioni ambientali non attribuibili a modelli a film sottile di Tellururo di Cadmio, accomunando celle solari a base di silicio

monocristallino drogato p, drogato n ed eterogiunzioni tra silicio monocristallino drogato n e silicio amorfo. Le dichiarazioni ambientali di prodotto per moduli fotovoltaici riportano che tutti i dati disponibili relativi ai flussi di energia e materia per i processi inclusi nei confini del sistema sono stati considerati nel modello, qualora i dati d'inventario non fossero presenti per un flusso sono stati utilizzati dati proxy basati su assunzioni conservative per rappresentare l'impatto ambientale. Sono state effettuate assunzioni riguardo la distanza percorsa e i mezzi impiegati durante la fase di vita A4 e riguardo la fase di fine vita C.

4.3.3 Assunzioni per la modellazione della produzione di energia elettrica nel Comune di Parma

Il profilo ambientale dei moduli fotovoltaici descritto per l'unità funzionale di 1 kWh e il tempo di neutralità carbonica sono stati modellati assumendo la produzione di energia elettrica localizzata nel Comune di Parma secondo i parametri espressi in Tabella 2. Come luogo di installazione è stato selezionato un parcheggio situato nel Comune di Parma alle coordinate di latitudine e longitudine rispettivamente di 44.837° e 10.338°. L'irraggiamento solare medio annuo è stato stimato attraverso il database PVGIS-SARAH2, come somma a partire dai dati di irraggiamento solare medio giornaliero durante i 12 mesi dell'anno. In questa fase dello studio l'orientamento è stato assunto verso sud e l'inclinazione pari a 30°. Il tempo di servizio dei moduli fotovoltaici è stato assunto uniforme per tutti i modelli e pari a 25 anni, indicato dalla NPCR029 come valore standard in assenza di certificazioni terze per la degradazione della potenza nominale all'80% di quella iniziale. Il profilo ambientale del provider *market value electricity, low voltage, IT* presente nel database *Ecoinvent 3.9* è stato assunto come rappresentativo dell'impatto ambientale per la produzione di 1 kWh in Italia per definire le emissioni evitate grazie alla produzione di energia elettrica da fotovoltaico.

4.3.4 Assunzioni per pensilina fotovoltaica

La pensilina fotovoltaica è stata modellata come una struttura composta tra barre rettangolari cave di alluminio con uno spessore della parete di 3 mm e zavorrata al suolo con blocchi di cemento, con area sufficiente per il montaggio di 18 moduli fotovoltaici. È stato assunto l'utilizzo di un singolo inverter da 10 kW e la lunghezza del cavo è stata stimata da Wild-Scholten et al (2006) pari a 2.3 m per m² di modulo installato. Il packaging della struttura di supporto è stato considerato composto da cartone, polietilene ad alta densità e polistirene, utilizzando una quantità approssimata stimata da inventari presenti in letteratura per le strutture ancorate a tetti spioventi e a tetti piani (Schwarz et al. 1992). Il trasporto attribuibile ai componenti della struttura è stato assunto effettuato via treno, macchina e camion per distanze diverse. Lo smantellamento e il disassemblaggio della struttura non è stato considerato mentre lo smaltimento dei componenti è stato modellizzato con trattamenti generici presenti nel database

EcoInvent 3.9. Il modello è stato costruito utilizzando dataset generici per tutti gli elementi della struttura di supporto che costituiscono il bilancio del sistema, escluse le barre di alluminio e i componenti in acciaio. Per la produzione delle barre di alluminio si è considerata una filiera di lavorazione composta da generici processi per prodotti in alluminio e un processo di estrusione in barre cave. Per i componenti in acciaio si è considerata una filiera di lavorazione composta da generici processi per prodotti in acciaio e un processo di laminazione in fogli. Il tempo di vita della struttura di sostegno, cavi elettrici e inverter è stato considerato uguale al tempo di servizio dei moduli fotovoltaici installati e pari a 25 anni. Non sono state considerate perdite legate al trasporto di energia elettrica e dispersioni dovute alla conversione da corrente continua DC a corrente alternata AC.

4.3.5 Assunzioni per sistema ancorato a tetto spiovente

Il sistema ancorato a tetto spiovente è stato modellato come una struttura composta tra barre rettangolari cave di alluminio con uno spessore della parete di 3 mm e ancorato al tetto spiovente inclinato di 20° con elementi in acciaio, con area sufficiente per il montaggio di 18 moduli fotovoltaici. È stato assunto l'utilizzo di un singolo inverter da 10 kW e la lunghezza del cavo è stata stimata da Wild-Scholten et al (2006) pari a 2.3 m per m² di modulo installato. Il packaging della struttura di supporto è stato considerato composto da cartone, polietilene ad alta densità e polistirene, utilizzando dati presenti in letteratura per le strutture ancorate a tetti spioventi (Schwarz et al. 1992). Il trasporto attribuibile ai componenti della struttura è stato assunto effettuato via treno, macchina e camion per distanze diverse. Lo smantellamento e il disassemblaggio della struttura non è stato considerato mentre lo smaltimento dei componenti è stato modellizzato con trattamenti generici presenti nel database *EcoInvent 3.9*. Il modello è stato costruito utilizzando dataset generici per tutti gli elementi della struttura di supporto che costituiscono il bilancio del sistema, escluse le barre di alluminio e i componenti in acciaio. Per la produzione delle barre di alluminio si è considerata una filiera di lavorazione composta da generici processi per prodotti in alluminio e un processo di estrusione in barre cave. Per i componenti in acciaio si è considerata una filiera di lavorazione composta da generici processi per prodotti in acciaio e un processo di laminazione in fogli. Il tempo di vita della struttura di sostegno, cavi elettrici e inverter è stato considerato uguale al tempo di servizio dei moduli fotovoltaici installati e pari a 25 anni. Non sono state considerate perdite legate al trasporto di energia elettrica e dispersioni dovute alla conversione da corrente continua DC a corrente alternata AC.

4.3.6 Assunzioni per sistema ancorato a tetto piano

Il sistema ancorato a tetto piano è stato modellato come una struttura composta tra barre rettangolari cave di alluminio con uno spessore della parete di 3 mm e ancorata con elementi in acciaio ad uno strato di polietilene, con area sufficiente per il montaggio di 18 moduli fotovoltaici. È stato assunto l'utilizzo di

un singolo inverter da 10 kW e la lunghezza del cavo è stata stimata da Wild-Scholten et al (2006) pari a 2.3 m per m² di modulo installato. Il packaging della struttura di supporto è stato considerato composto da cartone e polistirene, utilizzando dati presenti in letteratura per le strutture ancorate a tetti piani (Schwarz et al. 1992). Il trasporto attribuibile ai componenti della struttura è stato assunto effettuato via treno, macchina e camion per distanze diverse. Lo smantellamento e il disassemblaggio della struttura non è stato considerato mentre lo smaltimento dei componenti è stato modellizzato con trattamenti generici presenti nel database *EcoInvent* 3.9. Il modello è stato costruito utilizzando dataset generici per tutti gli elementi della struttura di supporto che costituiscono il bilancio del sistema, escluse le barre di alluminio e i componenti in acciaio. Per la produzione delle barre di alluminio si è considerata una filiera di lavorazione composta da generici processi per prodotti in alluminio e un processo di estrusione in barre cave. Per i componenti in acciaio si è considerata una filiera di lavorazione composta da generici processi per prodotti in acciaio e un processo di laminazione in fogli. Il tempo di vita della struttura di sostegno, cavi elettrici e inverter è stato considerato uguale al tempo di servizio dei moduli fotovoltaici installati e pari a 25 anni. Non sono state considerate perdite legate al trasporto di energia elettrica e dispersioni dovute alla conversione da corrente continua DC a corrente alternata AC.

4.3.7 Metodi di Allocazione

L'allocazione degli impatti è stata fatta seguendo le linee guida stabilite nella norma ISO 14025.

4.3.8 Categorie di impatto

Le categorie di impatto descritte in questo studio sono quelle definite dalla Regola di Categoria di Prodotto per moduli fotovoltaici NPCR029 ed elencate nella norma EN 15804. Le categorie di impatto, l'unità di misura e una breve descrizione sono riportate di seguito in Tabella 5.

Tabella 5 Categorie d'impatto considerate nello studio.

Categoria d'impatto	Indicatore	Unità di Misura	Descrizione
EN - Climate Change – Total IT- Cambiamento climatico - Totale	Global Warming Potential - Total (GWP – Total)	kg CO ₂ eq.	Somma delle tre sub-categorie di cambiamento climatico
EN - Climate Change – Fossil IT- Cambiamento climatico - Fossile	Global Warming Potential – Fossil (GWP – Fossil)	kg CO ₂ eq.	Questo indicatore tiene conto del GWP (Global Warming Potential - Potenziale di riscaldamento globale) derivante dalle emissioni e rimozioni di gas serra verso qualsiasi mezzo, originate dall'ossidazione o riduzione di combustibili fossili o materiali contenenti carbonio fossile attraverso la loro trasformazione o degradazione (es. combustione, incenerimento, smaltimento in discarica, ecc.). Questo indicatore considera anche il GWP derivante da emissioni di gas serra, come quelle provenienti da torba e calcinazione, nonché le rimozioni di gas serra, come la carbonatazione di materiali a base di cemento e calce.

EN - Climate Change – Biogenic IT- Cambiamento climatico - Biogenico	Global Warming Potential – Biogenic (GWP – Biogenic)	kg CO ₂ eq.	Questo indicatore considera il GWP delle rimozioni di CO ₂ nella biomassa provenienti da tutte le fonti eccetto le foreste native, come trasferimento di carbonio sequestrato dalla biomassa vivente, dalla natura al sistema di prodotto dichiarato come GWP-biogenico. Questo indicatore considera anche il GWP derivante dai trasferimenti di qualsiasi carbonio biogenico da sistemi di prodotto precedenti al sistema di prodotto in esame. Questo indicatore include anche le emissioni biogeniche in atmosfera dalla biomassa di tutte le fonti eccetto le foreste native, dovute a ossidazione o degradazione (es. combustione, smaltimento di rifiuti solidi), nonché tutti i trasferimenti di carbonio biogenico dalla biomassa di tutte le fonti eccetto le foreste native verso sistemi di prodotto successivi sotto forma di CO ₂ biogenico. Tutti gli scambi di carbonio attraverso il ciclo di vita (dal modulo A al modulo C) relativi al contenuto di carbonio biogenico nella biomassa proveniente da foreste native devono essere modellati come GWP-LULC secondo la versione più recente del documento di Linee Guida del PEF (Product Environmental Footprint).
EN - Climate Change – Land Use and Change IT- Cambiamento climatico – Uso e Cambiamento del Terreno	Global Warming Potential - Total (GWP – LULC)	kg CO ₂ eq.	Questo indicatore considera le emissioni e rimozioni di gas serra (CO ₂ , CO e CH ₄) derivanti dai cambiamenti negli stock di carbonio definiti causati dall'uso del suolo e dai cambiamenti d'uso del suolo associati all'unità dichiarata/funzionale. Questo indicatore include scambi di carbonio biogenico derivanti, ad esempio, da deforestazione o altre attività sul suolo (inclusi le emissioni di carbonio dal suolo).
EN – Ozone Depletion IT- Consumo di Ozono	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC 11 eq.	Questo indicatore considera il potenziale di consumo dello strato di ozono presente nella stratosfera che protegge la Terra dai raggi ultravioletti (UV) dannosi del sole. Clorofluorocarburi (CFC) e idroclorofluorocarburi (HCFC), quando rilasciate nell'atmosfera, possono favorire la distruzione delle molecole di ozono, aumentando l'incidenza di raggi UV che raggiungono la superficie terrestre.
EN – Acidification IT – Acidificazione	Acidification Potential (AP)	kg H ⁺ eq.	Questo indicatore rappresenta il potenziale di acidificazione dell'ecosistema, che può verificarsi quando composti acidi, come gli ossidi di azoto (NO _x) o l'anidride solforosa (SO ₂), vengono rilasciati nell'atmosfera e successivamente depositati a terra e in acqua attraverso le piogge acide.
EN – Eutrophication Aquatic Freshwater IT – Eutrofizzazione Acqua Dolce	Eutrophication Potential - Freshwater (EP – Freshwater)	kg PO ₄ eq.	Questo indicatore considera il potenziale di rilascio di nutrienti, principalmente azoto e fosforo, nell'ambiente (terrestre, marino e acque dolci). L'eccessivo apporto di nutrienti può portare alla crescita incontrollata di alghe e piante che consuma l'ossigeno e le risorse disponibili e causa la morte di altre forme di vita.
EN – Eutrophication Aquatic Marine IT – Eutrofizzazione Acqua Marina	Eutrophication Potential - Marine (EP – Marine)	kg N eq.	
EN – Eutrophication Terrestrial IT – Eutrofizzazione Terrestre	Eutrophication Potential - Terrestrial EP - Terrestrial	mol N eq.	
EN - Photochemical Ozone Formation IT – Formazione Fotochimica di Ozono	Photochemical Ozone Creation Potential (POCP)	kg NMVOC eq.	Questo indicatore rappresenta il potenziale di formazione di smog fotochimico, ovvero la formazione di ozono troposferico a livello del suolo a seguito della reazione di composti organici volatili e ossidi di azoto (NO _x), in presenza di luce solare. L'unità di misura di questo indicatore è il kg equivalente di composti organici volatili non metanici (NMVOCs).

EN – Depletion of Abiotic Resources – Minerals and Metals IT – Consumo di Risorse Abiotiche – Minerali e Metalli	Abiotic Depletion Potential - Minerals & Metals (ADP – Minerals & Metals)	kg Sb eq.	Questo indicatore rappresenta il potenziale consumo di risorse abiotiche, in particolare minerali e metalli. Indica la riduzione della disponibilità di queste risorse a causa del loro uso nei processi produttivi, considerando la loro scarsità relativa.
EN – Depletion of Abiotic Resources – Fossil fuels IT – Consumo di Risorse Abiotiche – Combustibili fossili	Abiotic Depletion Potential - Fossil ADP - Fossil	MJ, net calorific value	Questo indicatore rappresenta il potenziale di consumo di risorse energetiche non rinnovabili, come petrolio, carbone e gas naturale
EN – Water use IT – Consumo Acqua	Water Depletion Potential (WDP)	m ³	Questo indicatore rappresenta il potenziale consumo di risorse idriche. L'eccessivo prelievo di risorse idriche può portare all'esaurimento di fonti d'acqua, mettendo sotto stress gli ecosistemi e minacciando la disponibilità di acqua per le persone e l'agricoltura.

5. Inventario del Ciclo di Vita (LCI)

L'approccio di modellazione impiegato per i servizi di produzione di energia elettrica da fotovoltaico è caratterizzato come una "scatola nera", il che significa che si concentra esclusivamente sui flussi di ingresso e uscita attribuibili al servizio. In questo contesto, i processi e le attività di assemblaggio dei componenti e installazione del sistema erogante il servizio non sono stati un elemento centrale dell'analisi. Al fine di mantenere un'omogeneità del sistema rispetto agli studi ambientali dei moduli fotovoltaici, sono stati inclusi nell'analisi i materiali per il packaging e lo smaltimento a fine vita per ogni flusso di prodotto in ingresso. Sebbene l'approccio di modellazione "scatola nera" possa non considerare ciascun singolo processo interno, ha offerto un metodo pragmatico ed efficiente per valutare l'impatto ambientale complessivo dei servizi. Questo è stato ottenuto concentrandosi sui fattori di input, output e impatto ambientale più significativi, fornendo così una panoramica completa del profilo ambientale per ciascuno dei servizi analizzati.

5.1 Procedura di raccolta dati

La procedura di raccolta dati è stata eseguita per mezzo dell'analisi di dati di letteratura relativa a strutture di supporto simili a quelle modellate, documentazione e cataloghi disponibili online per servizi accomunabili a quelli considerati. Le certificazioni ambientali di prodotto di moduli fotovoltaici monofacciali sono state considerate per definire il profilo ambientale medio dei moduli fotovoltaici installati sulle tre diverse strutture di supporto. L'impatto ambientale dei moduli fotovoltaici installati è pertanto la media degli indici di impatto ambientale riportati nelle Dichiarazione Ambientali di Prodotto facenti riferimento a moduli fotovoltaici monofacciali.

5.2 Pensilina Fotovoltaica

La Pensilina Fotovoltaica è stata modellizzata basandosi su componenti e quantità presenti in cataloghi online e in letteratura come riportato in Tabella 6.

Tabella 6 Inventario della pensilina fotovoltaica.

Componenti	Quantità
Alluminio	545 kg
Acciaio	62.9 kg
Cemento	1200 kg
Moduli fotovoltaici monofacciali	18 moduli
Cavi Elettrici	96.5 metri / 36.7 kg
Invertitore DC/AC 10 kWh	74 kg
Cartone ondulato	5.6 kg
Polietilene ad alta densità	0.1 kg
Polistirene	0.35 kg

Trasporto	Distanza
Camion	50 km
Treno	200 km
Autovettura	100 km

5.2.1 Input e assunzioni

5.2.1.1 Barre cave in alluminio

La struttura di supporto è stata considerata formata da barre cave di alluminio di spessore pari a 5 mm e sezione rettangolari di dimensioni 120mm x 160 mm. La struttura è composta da 2 barre lunghe 6.26 metri e 7 barre lunghe 6.7 metri a comporre l'area di appoggio per l'installazione dei moduli fotovoltaici, e 6 barre lunghe 2.5 a sostenerle. Le barre sono state modellate assumendo come materia prima una lega generica di alluminio adatto all'estrusione proveniente da fonti diverse, soggetta a ulteriori processi di lavorazione generica dell'alluminio e estrusione in barre cave. Il processo per la produzione di barre cave di alluminio è stato modellato attraverso i seguenti flussi in input, descritti in Tabella 7.

Tabella 7 Input per la modellizzazione di barre cave di alluminio.

Barre cave di alluminio	
Flusso 1	aluminium,wrought alloy
Provider	market for aluminium, wrought alloy aluminium, wrought alloy Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'aluminium, wrought alloy', in the Global geography.;In this market, expert judgement was used to develop product specific transport distance estimations. This activity starts at the gate of the activities that produce 'aluminium, wrought alloy', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'aluminium, wrought alloy', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/946ecb91-72e1-412b-933a-ca21c5ca69e4/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 2	metal working, average for aluminium product manufacturing
Provider	market for metal working, average for aluminium product manufacturing metal working, average for aluminium product manufacturing Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for

	the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'metal working, average for aluminium product manufacturing', in the Global geography.;Transport from producers to consumers of this product in the geography covered by the market is included.;This is delivering the service of 'metal working, average for aluminium product manufacturing'. The dataset represents average manufacturing processes to make a semi-manufactured aluminium product into a final product. The service includes machinery, infrastructure, metal operations and additional aluminium input to consider for the provessing losses, but it excludes the main aluminium input and the process of degreasing. This activity starts with the service generation.
Flow 3	section bar extrusion, aluminium
Provider	market for section bar extrusion, aluminium section bar extrusion, aluminium Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'section bar extrusion, aluminium', in the Global geography.;Transport from producers to consumers of this product in the geography covered by the market is included. This activity starts at the gate of the activities that produce 'section bar extrusion, aluminium', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'section bar extrusion, aluminium', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/2a0ca3ee-166b-4326-9caa-0baa4eabf033/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce

5.2.1.2 Componenti in acciaio

In assenza di dati primari la quantità di acciaio presente nella struttura pensilina fotovoltaica è stata stimata da dati presenti in letteratura per strutture di supporto per moduli fotovoltaici e scalata per i metri quadri di superficie di installazione disponibili. I componenti sono modellati assumendo come materia prima acciaio basso legato, soggetta a ulteriori processi di lavorazione generica dell’acciaio e laminazione in fogli. Il processo per la produzione di componenti in acciaio è stato modellato attraverso i seguenti flussi in input, descritti in Tabella 8.

Tabella 8 Input per la modellizzazione di componenti in acciaio.

Componenti in acciaio	
Flusso 1	steel, low-alloyed
Provider	market for steel, low-alloyed steel, low-alloyed Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography,

	connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'steel, low-alloyed', in the Global geography.;Transport distances are based on the ecoinvent "Default Transport Assumptions" model, accessible on the ecoinvent website. At the gate of the steelmaking plant with the collection of the steel, low-alloyedl for distribution. At the gate of the manufacturing plant with the cast steel ready for use. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/3b94d9bf-56fd-4e55-8648-d3347bd5b3b2/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 2	metal working, average for steel product manufacturing
Provider	market for metal working, average for steel product manufacturing metal working, average for steel product manufacturing Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'metal working, average for steel product manufacturing', in the Global geography.;Transport from producers to consumers of this product in the geography covered by the market is included.;This is delivering the service of 'metal working, average for steel product manufacturing'. The dataset represents average manufacturing processes to make a semi-manufactured steel product into a final product. The service includes machinery, infrastructure, metal operations and additional steel input to consider for the provessing losses, but it excludes the main steel input and the process of degreasing. This activity starts with the service generation. This activity ends with the service supplied to its consumers. Transport or losses are considered irrelevant for this product. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/9f9c9676-2d88-4578-a92f-ed9f58e5a23a/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flow 3	sheet rolling, steel
Provider	market for sheet rolling, steel sheet rolling, steel Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography,

	connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'sheet rolling, steel', in the Global geography.;Transport from producers to consumers of this product in the geography covered by the market is included.;This is delivering the service of 'sheet rolling, steel'. For the applications that the products of hot rolling are unsatisfactory, e.g., with respect to cross section, surface quality, dimensional accuracy, and general finish, this service can be used. It is based on cold rolling while the end product has high quality surface finish and precise metallurgical properties for use in high specification purposes. This service is to be used only for un- and low-alloyed steel. The metal input is not included in this dataset. Thus, this service should be used along with 1 kg of steel. The exterior finish of rolled steel is very desirable when aesthetics and visual appeal are a priority. Thus, it used in applications like strips, bars, rods, home appliances, roof and wall systems, metal furniture, aerospace structural members, etc. This activity starts with the service generation. This activity ends with the service supplied to its consumers. Transport or losses are considered irrelevant for this product. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/71adbd59-5409-4428-afe4-949ac9586c84/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
--	--

5.2.1.3 Zavorra in cemento

La struttura di sostegno è stata modellata considerando la presenza di due zavorre di cemento dal peso di 600 kg ciascuna per ancorare la pensilina al terreno. Il peso della zavorra in cemento è stato valutato da cataloghi commerciali per pensiline fotovoltaiche zavorrate. Le zavorre in cemento sono modellizzate usando un provider generico da database, Tabella 9.

Tabella 9 Input per la modellizzazione di zavorre in cemento.

Flusso	Zavorra di cemento da 600 kg
Provider	market for concrete block concrete block Cutoff, U - RoW
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This activity represents the market for 1 kg of concrete block. The default transport distances are taken

	from the ecoinvent Global default transport model available on the ecoinvent website. This product is though assumed to be only transported by lorry and rail (i.e. inland waterways are excluded). From the concrete block factory. Includes the transportation of concrete blocks to the point of delivery, which can be construction material shops or construction sites. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/7779370b-4496-4a08-9cd7-30d4d459005f/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
--	--

5.2.1.4 Cavi elettrici

I cavi elettrici sono stati modellizzati da dati di letteratura che descrivono l'inventario di strutture di sostegno per installazione su tetti. La lunghezza tipica dei cavi elettrici impiegati è di 2.3 metri per metro quadro di modulo fotovoltaico installato, con un peso stimato di 0.38 kg per metro di cavo. I cavi elettrici sono modellizzati usando un provider generico da database per cavi a tre fili, Tabella 10.

Tabella 10 Input per la modellizzazione dei cavi elettrici.

Flusso	Cavi elettrici a tre fili
Provider	market for cable, three-conductor cable cable, three-conductor cable Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'cable, three-conductor cable', in the Global geography.;In this market, expert judgement was used to develop product specific transport distance estimations. This activity starts at the gate of the activities that produce 'cable, three-conductor cable', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'cable, three-conductor cable', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/a63c7596-a6ca-47d2-8c50-633f6887df29/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce

5.2.1.5 Inverter

L'inverter è necessario per trasformare l'energia elettrica prodotta dalla pensilina fotovoltaica da corrente elettrica continua ad alternata prima dell'immissione nel sistema elettrico. Poiché la potenza nominale

installata per pensilina fotovoltaica è stata stimata di 9.04 kWp, l'inverter è stato modellizzato considerando 4 inverter da 2.5 kW usando un provider generico da database, Tabella 11

Tabella 11 Input per la modellizzazione di inverter da 10 kW.

Flusso	Inverter da 10 kW (4 inverter da 2.5 kW)
Provider	market for inverter, 2.5kW inverter, 2.5kW Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'inverter, 2.5kW', in the Global geography.;Transport from producers to consumers of this product in the geography covered by the market is included.;This is a mobile infrastructure, representing the product of an inverter that is used to convert direct current voltage to alternating current voltage in common appliances. It has a total mass about 18.5 kg and a capacity of 2.5kW. Its production represents all materials necessary to construct it, energy consumption during manufacturing, packaging and end-of-life. This activity starts at the gate of the activities that produce 'inverter, 2.5kW', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'inverter, 2.5kW', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/c37ec386-980d-4185-bc2d-d9dd1b75b798/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce

5.2.1.6 Packaging

Il packaging per la struttura, in quanto per i moduli fotovoltaici è stato già considerato nelle dichiarazioni di prodotto ambientale, è stato modellizzato considerando l'utilizzo maggiore riportato in letteratura per strutture di sostegno per tetti. Il packaging è composto da cartone ondulato, polietilene e polistirene, utilizzando provider generici da database, Tabella 12.

Tabella 12 Input modellizzazione del packaging

Packaging	
Flusso 1	Cartone ondulato
Provider	market for corrugated board box corrugated board box Cutoff, U - RER
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in

	the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This dataset represents the average transport of corrugated board boxes in the European market. Corrugated board boxes are commonly not traded globally but rather on regional/local markets. This dataset therefore represents the market for such boxes in Europe. Transport distances and modes were estimated. Losses are assumed negligible for this type of product.;Containerboard is the umbrella term for two different types of board, linerboard and fluting medium, which are both required to produce corrugated board. Linerboard is a flat layer of board, which can be further distinguished in kraftliner and testliner, depending on whether it is of virgin or recycled origin, respectively. Fluting medium is the corrugated middle layer between a top and bottom layer of linerboard. Together all three layers constitute corrugated board. Virgin fluting medium is commonly called semichemical fluting, while recycled fluting can also be called wellenstoff.;imageUriTagReplacefb7c96f2-1933-4a81-a33a-515d0a5fb151 The activity starts at the gate of the corrugated box board factory. The activity ends at the gate of the using entity. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/1190f618-587e-461d-829e-8e7cf9380cb0/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 2	Polietilene
Provider	market for polyethylene, high density, granulate polyethylene, high density, granulate Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'polyethylene, high density, granulate', in the Global geography.;In this market, expert judgement was used to develop product specific transport distance estimations.;'polyethylene, high density, granulate', is a plastic product of fossil origin, it is not biodegradable and it is a thermoplastic material. This product consists of 100% virgin material with no content of recycled material. The product is used in the following applications and sectors: packaging material including crates, trays, bottles, food packaging, jerry cans, drums, industrial bulk containers etc, food containers, toys, petrol tanks, industrial wrapping and film, fibres and textiles like in ropes, fishing and sport nets, nets for agricultural use, industrial and decorative fabrics,

	pipes, wiring and cables. This activity starts at the gate of the activities that produce 'polyethylene, high density, granulate', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'polyethylene, high density, granulate', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/716baf6b-d697-49b2-a256-4d9cdb585b91/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 3	Polistirene
Provider	market for polystyrene, high impact polystyrene, high impact Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'polystyrene, high impact', in the Global geography.;In this market, expert judgement was used to develop product specific transport distance estimations.;'polystyrene, high impact', is a plastic product of fossil origin, it is not biodegradable and it is a thermoplastic material. This product consists of 100% virgin material with no content of recycled material. The product is used in the following applications and sectors: many applications such as food and non-food packaging, disposable cups and cutlery, furniture, toys and consumer goods, as well as electronics and appliances. It is also used to make engineering resin blends with polyphenylene oxide for the automotive industry, electrical appliances, and electronics. This activity starts at the gate of the activities that produce 'polystyrene, high impact', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'polystyrene, high impact', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/43bfa25f-6e01-4a19-99ca-4978b1f4e0b2/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce

5.2.1.7 Trasporto

La tipologia di veicoli coinvolti nel trasporto è stata valutata da dati di letteratura per strutture di sostegno per tetti. Il peso di materiali trasportati è dato dalla somma degli elementi che compongono la struttura e il loro packaging. Il trasporto è stato modellizzato da provider generici da database, Tabella 13.

Tabella 13 Input per la modellizzazione del trasporto.

Trasporto																
Flusso 1	Trasporto via camion															
Provider	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cutoff, U - RER															
Descrizione	This dataset represents the service of 1tkm freight transport in a lorry of the size class 16-32 metric tons gross vehicle weight (GVW) and Euro VI emissions class. The transport datasets refer to the entire transport life cycle i.e. to the construction, operation, maintenance and end of life of vehicle and road infrastructures. Fuel consumption and emissions are for average European journeys and load factors and not representative of a specific transport scenario. The average load factors are taken from the Tremove model v2.7b (2009) and EcoTransIT (2011) report. These are as follows: <table><tr><th>Lorry size class</th><th>Average load factor</th><th>GVW</th></tr><tr><td>3.5-7.5t</td><td>0.98t</td><td>4.98t</td></tr><tr><td>7.5-16t</td><td>3.29t</td><td>9.29t</td></tr><tr><td>16-32t</td><td>15.79t</td><td>15.96t</td></tr><tr><td>>32t</td><td>29.96t</td><td>29.96t</td></tr></table> The lorry size and load factor determines the GVW and therefore also the fuel consumption and amount of both exhaust and non-exhaust emissions. Non-exhaust emissions are those resulting from tyre, brake and road wear; Fuel consumption and exhaust emissions are taken from v3.1 of the HBEFA model, using the data for Germany and without applying model weighting. There are a higher number of size categories used in HBEFA than in ecoinvent and so the data are grouped in order to fit the lorry size classes used in ecoinvent. The selective catalytic reduction (SCR) technology is around 3 times more common than that of exhaust gas recovery (EGR) as an emissions reduction measure and so the emission factors given in the dataset are weighted to reflect this. The data for the HBEFA categories SCR* and VI* were disregarded. The exhaust emissions caused by the burning of fuel are either fuel dependent (fuel type and quantity) or Euro class dependent. The latter reflect the emission regulations to which the vehicle complies. Regulated emissions are CO, NOx, particulate matter (PM) and total hydrocarbons (HC). Data from the Emissions Inventory Guidebook (EMEP/EEA, 2013) were used for specific exhaust emissions not covered by the HBEFA model; Non-exhaust emissions are accounted for as weight dependent by-products and exist as separate datasets; For road infrastructure the expenditures and environmental interventions due to construction of roads have been allocated based on the gross tonne kilometer performance. Expenditures due to operation of the road infrastructure, as well as land use have been allocated based on the yearly vehicle kilometer performance. The same assumption on vehicle lifetime performance has been	Lorry size class	Average load factor	GVW	3.5-7.5t	0.98t	4.98t	7.5-16t	3.29t	9.29t	16-32t	15.79t	15.96t	>32t	29.96t	29.96t
Lorry size class	Average load factor	GVW														
3.5-7.5t	0.98t	4.98t														
7.5-16t	3.29t	9.29t														
16-32t	15.79t	15.96t														
>32t	29.96t	29.96t														

	transferred from the ecoinvent v2 datasets of 540 000 km/vehicle. The production, maintenance and disposal of the vehicle are as reported in the ecoinvent (2007) report on transport services. ;Main data sources;;De Ceuster, G., et al. (2009) TREMOVE: Final Report. Model code v2.7b, 2009. European Commission, Brussels.;Keller, M. et al. (2010) Handbook emission factors for road transport v3.1, HBEFA. INFRAS, Berne, CH. ;Knörr, W. et al. (2011) Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports (EcoTransIT): Methodology and data update. Berlin, Hannover, Heidelberg, DE.;Ntziachristos, L., et al. (2013) EMEP/EEA air pollutant emissions inventory guidebook 2009: Exhaust emissions from road transport. European Environment Agency, Copenhagen, DK.;Spielmann, M., et al. (2007) Transport Services. ecoinvent report No. 14., Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. From combustion of fuel in the engine. The dataset takes as input the infrastructure of the lorry and road network, the materials and efforts needed for maintenance of these and the fuel consumed in the vehicle for the journey. The activity ends with the transport service of 1tkm and the emissions of exhaust and non-exhaust emissions into air, water and soil. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/5604bf2a-7b2a-495e-9671-6f1d4a78bdc2/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 2	Trasporto via treno
Provider	transport, freight train transport, freight train Cutoff, U - IT
Descrizione	The dataset represents the entire transport life cycle of a freight train in Italy. The data of the energy use and operation emissions are average data for the operation of goods transportation by rail in Italy. The data has been determined top down, by combining the total yearly energy consumption and the yearly tkm-performance of goods transportation. The dataset starts with the production of a locomotive. The dataset ends with the service of transporting 1 ton over a distance of 1 km by a freight train. The dataset includes the production and the maintenance of the locomotive and the goods wagon, the construction of the railway track and the energy use and operation emissions of a freight train using diesel and electricity. The inventory includes as well the actual energy consumption for an average goods train (1023Gt) in Italian using electro and diesel energy. In addition, the diesel consumption and emissions of shunting processes are accounted for. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/0d5a9a63-f10a-4a60-afdd-0b1b01bba4d9/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 3	Trasporto via autovettura

Provider	transport, freight, light commercial vehicle transport, freight, light commercial vehicle Cutoff, U - Europe without Switzerland
Descrizione	Inventory refers to the entire transport life cycle. For road infrastructure, expenditures and environmental interventions due to construction of roads have been allocated based on the Gross tonne kilometre performance. Expenditures due to operation of the road infrastructure, as well as land use have been allocated based on the yearly vehicle kilometre performance. For the attribution of vehicle share to the transport performance a vehicle life time performance of 2.39E05 pkm/vehicle has been assumed. The data of the energy use and combustion emissions are average data for the operation of an average Swiss van (fleet average) in the year 2005, comprising various emission technologies. operation of vehicle; production and maintenance of vehicles; construction of road. In the energy use and combustion emissions dataset, fuel consumption is included. Direct airborne emissions of gaseous substances, particulate matters and heavy metals are accounted for. Particulate emissions comprise exhaust- and abrasions emissions. Heavy metal emissions to soil and water caused by tyre abrasion are included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/db1b1329-f664-42df-9f7e-a23217095167/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce

5.2.1.8 Fine Vita

La fase di fine vita dei componenti della pensilina fotovoltaici è stata modellizzata fino ai cancelli dell’impianto di separazione e trattamento preliminare e non specifico dei rifiuti. I consumi legati allo smantellamento della pensilina fotovoltaica nei suoi componenti non sono stati considerati. La modellizzazione usa provider generici da database, Tabella 14.

Tabella 14 Input per la modellizzazione della separazione e disassemblaggio dei rifiuti.

Separazione e disassemblaggio	
Flusso 1	Fine vita barre di alluminio
Provider	treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting Cutoff, U - RER
Descrizione	This dataset is based on two sources: the European Aluminium Association 2005 LCI data (EAA, 2008); and (2) the ecoinvent v2.2 dataset for the same activity (Althaus, 2009), itself largely based on EAA data from 2000. Priority was given to data contained in EAA (2008); Althaus (2009) was used only in cases where it was found to be more complete than EAA (2008).;Note that EAA only obtained 2005 input and output data for wrought aluminium shredding and de-laquering.

	Other activities (cast alloy shredding, sink and float, cutting and baling, drying and deoiling and dismantling) were characterized using 1998 data, thought to be largely representative of activities in 2005. The different activities were scaled using scrap make-up data representative of 2005.;Note that the prepared scrap output has been renamed from "aluminium scrap, post-consumer, prepared for remelting" to "aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling" since the prepared scrap is treated downstream in both refining and remelting activities. Scrap preparation begins with the receiving of post-consumer aluminium scrap. This scrap can come from very diverse sources, e.g. motor block engines, used beverage cans, facade panel, etc. The actual activities associated with scrap preparation will depend on the scap nature and can include shredding, sink and float, cutting and baling, drying and de-oiling, de-laquering, dismantling. Some scap requires no preparation whatsoever. This dataset represents the inputs and outputs for the preparation of averaged scrap and hence may not be representative of inputs and outputs associated with any particular type of scrap. For more information on the shares of scrap types and types of treatment activities included in this dataset, please refer to EAA 2008. The activity ends with the supply of post-consumer aluminium scrap ready to be recycled. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/769288bc-6ecd-4131-bd65-abb963e3a785/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 2	Fine vita componenti acciaio
Provider	treatment of waste reinforcement steel, sorting plant waste reinforcement steel Cutoff, U - RoW
Descrizione	The waste contains 1kg steel (GSD=100%). Waste density is 7900 kg/m3. ;[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] energy for dismantling, machines for handling in sorting plant, electricity demand for sorting plant, transport

	to dismantling facilities, Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/3cd2f704-4eb8-49c9-b43b-e45ead7c85e2/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 3	Fine vita zavorra cemento
Provider	treatment of waste concrete, not reinforced, sorting plant waste concrete, not reinforced Cutoff, U - Europe without Switzerland
Descrizione	The waste contains 1kg inert material (GSD=100%). Waste density is 2200 kg/m3. energy for dismantling, particulate matter emissions from dismantling and handling, machines for handling in sorting plant, electricity demand for sorting plant, transport to dismantling facilities, final disposal of waste material, Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/4ec6b187-180e-4aa8-9e3e-0298ba0a5c65/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 4	Fine vita inverter 10 kW
Provider	treatment of electronics scrap from control units electronics scrap from control units Cutoff, U - RER
Descrizione	The dismantled control unit has a composition of 46% steel (housing), 32% plastics, 14% printed wiring boards and 8% cables (various types).;[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] This module includes the dismantling of the electronic control equipment. The included processes are: transport to dismantling site and dismantling. The further treatment itself is not part of this dataset here. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/daa152c7-ff72-4f0d-bdf3-23c160527b58/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 5	Fine vita cavi elettrici
Provider	treatment of waste electric wiring, collection for final disposal waste electric wiring Cutoff, U - RoW

Descrizione	The waste contains 0.615kg cable insulation (GSD=101.1%) and 0.385kg copper (GSD=102.2%). Waste density is 4100 kg/m3. Allocation of energy production in waste incineration: no substitution or expansion. Total burden allocated to waste disposal function of waste incinerator.:[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] transport to dismantling facilities, final disposal of waste material, Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/9d68d46c-0491-4e02-ab4f-d19631b2df05/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 6	Fine vita cartone packaging
Provider	treatment of waste plaster-cardboard sandwich, sorting plant waste plaster-cardboard sandwich Cutoff, U - CH
Descrizione	The waste contains 0.834kg gypsum (GSD=100.4%) and 0.166kg cardboard (GSD=104.1%). Waste density is 1000 kg/m3. ;[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] energy for dismantling, particulate matter emissions from dismantling and handling, machines for handling in sorting plant, electricity demand for sorting plant,

	transport to dismantling facilities, final disposal of waste material, Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/dc986db6-c12c-427f-a05c-dcfcb3d0e9c7/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 7	Fine vita polistirene packaging
Provider	treatment of waste plastic plaster, sorting plant waste plastic plaster Cutoff, U - CH
Descrizione	The waste contains 1kg plastic plaster (GSD=100%). Waste density is 1300 kg/m3. ;[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] particulate matter emissions from dismantling and handling, machines for handling in sorting plant, electricity demand for sorting plant, transport to dismantling facilities, final disposal of waste material, Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/22b1f302-64d3-4dc8-8572-757740c0c15c/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 8	Fine vita polietilene packaging
Provider	treatment of waste polyethylene, for recycling, unsorted, sorting waste polyethylene, for recycling, sorted Cutoff, U - Europe without Switzerland
Descrizione	The functional unit represents the treatment of unsorted waste polyethylene, for recycling, yielding 1 kg of sorted waste polyethylene, for recycling.;Once the postconsumer PET has been collected, they must be separated from other co-collected materials and plastics. Although some recovered plastic is separated by curbside sorting and the use of separate bins at drop-off recycling centers, sorting and separation of plastics most commonly takes place at material recovery facilities (MRFs). Sorting operations at MRFs range from manual sorting of items on a conveyor to highly automated systems using magnets, air classifiers, optical sorters, and other technologies to sort and separate mixed incoming materials. Postconsumer plastics may be separated and baled as mixed plastics, or the facility may have the

	capability to further sort down to individual resin bales. Service is starting with the receipt of unsorted waste PE This module includes all processes of the sorting of waste PE up to the factory gate. Machinery infrastructure is excluded no allocation involved Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/6ec780e2-c9f1-44a3-b2e1-141668e37f80/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
--	---

5.3 Sistema ancorato a tetto spiovente

Il sistema ancorato a tetto spiovente è stato modellizzato basandosi su dati presenti in letteratura come riportato in Tabella 15.

Tabella 15 Inventario del sistema ancorato a tetto spiovente.

Componenti	Quantità
Alluminio	119 kg
Acciaio	62.9 kg
Moduli fotovoltaici monofacciali	18 moduli
Cavi Elettrici	96.5 metri / 36.7 kg
Invertitore DC/AC 10 kWh	74 kg
Cartone ondulato	5.6 kg
Polietilene ad alta densità	0.1 kg
Polistirene	0.3 kg
Trasporto	Distanza
Camion	50 km
Treno	200 km
Autovettura	100 km

5.3.1 Input e assunzioni

5.3.1.1 Barre cave di alluminio

La struttura di supporto è stata considerata formata da barre di alluminio. La quantità di acciaio necessaria a sostenere l'installazione di moduli fotovoltaici su un'area di 41.9 m² è stata valutata dai dati di inventario presenti in letteratura per una struttura montata su un tetto spiovente. Le barre sono state modellate assumendo come materia prima una lega generica di alluminio adatto all'estrusione proveniente da fonti diverse, soggetta a ulteriori processi di lavorazione generica dell'alluminio e estrusione in barre cave. Il processo per la produzione di barre cave di alluminio è stato modellato attraverso i seguenti flussi in input, descritti in Tabella 16.

Tabella 16 Input per la modellizzazione di barre cave di alluminio.

Barre cave di alluminio	
Flusso 1	aluminium, wrought alloy
Provider	market for aluminium, wrought alloy aluminium, wrought alloy Cutoff, U - GLO

Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'aluminium, wrought alloy', in the Global geography.;In this market, expert judgement was used to develop product specific transport distance estimations. This activity starts at the gate of the activities that produce 'aluminium, wrought alloy', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'aluminium, wrought alloy', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/946ecb91-72e1-412b-933a-ca21c5ca69e4/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 2	metal working, average for aluminium product manufacturing
Provider	market for metal working, average for aluminium product manufacturing metal working, average for aluminium product manufacturing Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'metal working, average for aluminium product manufacturing', in the Global geography.;Transport from producers to consumers of this product in the geography covered by the market is included.;This is delivering the service of 'metal working, average for aluminium product manufacturing'. The dataset represents average manufacturing processes to make a semi-manufactured aluminium product into a final product. The service includes machinery, infrastructure, metal operations and additional aluminium input to consider for the processing losses, but it excludes the main aluminium input and the process of degreasing. This activity starts with the service generation.
Flow 3	section bar extrusion, aluminium
Provider	market for section bar extrusion, aluminium section bar extrusion, aluminium Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography,

	connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'section bar extrusion, aluminium', in the Global geography.;Transport from producers to consumers of this product in the geography covered by the market is included. This activity starts at the gate of the activities that produce 'section bar extrusion, aluminium', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'section bar extrusion, aluminium', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/2a0ca3ee-166b-4326-9caa-0baa4eabf033/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
--	--

5.3.1.2 Componenti in acciaio

In assenza di dati primari la quantità di acciaio presente nel sistema ancorato a tetto spiovente è stata stimata da dati presenti in letteratura per strutture di supporto per moduli fotovoltaici. I componenti sono modellati assumendo come materia prima acciaio basso legato, soggetta a ulteriori processi di lavorazione generica dell'acciaio e laminazione in fogli. Il processo per la produzione di componenti in acciaio è stato modellato attraverso i seguenti flussi in input, descritti in Tabella 17.

Tabella 17 Input per la modellizzazione di componenti in acciaio.

Componenti in acciaio	
Flusso 1	steel, low-alloyed
Provider	market for steel, low-alloyed steel, low-alloyed Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'steel, low-alloyed', in the Global geography.;Transport distances are based on the ecoinvent "Default Transport Assumptions" model, accessible on the ecoinvent website. At the gate of the steelmaking plant with the collection of the steel, low-alloyedl for distribution. At the gate of the manufacturing plant with the cast steel ready for use. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/3b94d9bf-

	56fd-4e55-8648-d3347bd5b3b2/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 2	metal working, average for steel product manufacturing
Provider	market for metal working, average for steel product manufacturing metal working, average for steel product manufacturing Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'metal working, average for steel product manufacturing', in the Global geography.;Transport from producers to consumers of this product in the geography covered by the market is included.;This is delivering the service of 'metal working, average for steel product manufacturing'. The dataset represents average manufacturing processes to make a semi-manufactured steel product into a final product. The service includes machinery, infrastructure, metal operations and additional steel input to consider for the processing losses, but it excludes the main steel input and the process of degreasing. This activity starts with the service generation. This activity ends with the service supplied to its consumers. Transport or losses are considered irrelevant for this product. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/9f9c9676-2d88-4578-a92f-ed9f58e5a23a/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flow 3	sheet rolling, steel
Provider	market for sheet rolling, steel sheet rolling, steel Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'sheet rolling, steel', in the Global geography.;Transport from producers to consumers of this product in the geography covered by the market is included.;This is delivering the service of 'sheet rolling, steel'. For the applications that the products of hot rolling are unsatisfactory, e.g., with respect to cross section, surface quality, dimensional accuracy, and general finish, this service can be used. It is based on cold rolling while the end product has high quality surface finish and precise metallurgical

	properties for use in high specification purposes. This service is to be used only for un- and low-alloyed steel. The metal input is not included in this dataset. Thus, this service should be used along with 1 kg of steel. The exterior finish of rolled steel is very desirable when aesthetics and visual appeal are a priority. Thus, it used in applications like strips, bars, rods, home appliances, roof and wall systems, metal furniture, aerospace structural members, etc. This activity starts with the service generation. This activity ends with the service supplied to its consumers. Transport or losses are considered irrelevant for this product. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/71adbd59-5409-4428-afe4-949ac9586c84/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
--	---

5.3.1.3 Cavi elettrici

I cavi elettrici sono stati modellizzati da dati di letteratura che descrivono l'inventario di strutture di sostegno per installazione su tetti. La lunghezza tipica dei cavi elettrici impiegati è di 2.3 metri per metro quadro di modulo fotovoltaico installato, con un peso stimato di 0.38 kg per metro di cavo. I cavi elettrici sono modellizzati usando un provider generico da database per cavi a tre fili, Tabella 18.

Tabella 18 Input per la modellazione dei cavi elettrici.

Flusso	Cavi elettrici a tre fili
Provider	market for cable, three-conductor cable cable, three-conductor cable Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'cable, three-conductor cable', in the Global geography.;In this market, expert judgement was used to develop product specific transport distance estimations. This activity starts at the gate of the activities that produce 'cable, three-conductor cable', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'cable, three-conductor cable', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/a63c7596-a6ca-47d2-8c50-633f6887df29/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce

5.3.1.4 Inverter

L'inverter è necessario per trasformare l'energia elettrica prodotta dalla pensilina fotovoltaica da corrente elettrica continua ad alternata prima dell'immissione nel sistema elettrico. Poiché la potenza nominale installata per pensilina fotovoltaica è stata stimata di 9.04 kWp, l'inverter è stato modellizzato considerando 4 inverter da 2.5 kW usando un provider generico da database, Tabella 19.

Tabella 19 Input per la modellizzazione di inverter da 10 kW.

Flusso	Inverter da 10 kW (4 inverter da 2.5 kW)
Provider	market for inverter, 2.5kW inverter, 2.5kW Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'inverter, 2.5kW', in the Global geography.;Transport from producers to consumers of this product in the geography covered by the market is included.;This is a mobile infrastructure, representing the product of an inverter that is used to convert direct current voltage to alternating current voltage in common appliances. It has a total mass about 18.5 kg and a capacity of 2.5kW. Its production represents all materials necessary to construct it, energy consumption during manufacturing, packaging and end-of-life. This activity starts at the gate of the activities that produce 'inverter, 2.5kW', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'inverter, 2.5kW', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/c37ec386-980d-4185-bc2d-d9dd1b75b798/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce

5.3.1.5 Packaging

Il packaging per la struttura, in quanto per i moduli fotovoltaici è stato già considerato nelle dichiarazioni di prodotto ambientale, è stato modellizzato considerando l'utilizzo maggiore riportato in letteratura per strutture di sostegno per tetti. Il packaging è composto da cartone ondulato, polietilene e polistirene, utilizzando provider generici da database, Tabella 20.

Tabella 20 Input modellizzazione del packaging.

Packaging	
Flusso 1	Cartone ondulato

Provider	market for corrugated board box corrugated board box Cutoff, U - RER
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This dataset represents the average transport of corrugated board boxes in the European market. Corrugated board boxes are commonly not traded globally but rather on regional/local markets. This dataset therefore represents the market for such boxes in Europe. Transport distances and modes were estimated. Losses are assumed negligible for this type of product.;Containerboard is the umbrella term for two different types of board, linerboard and fluting medium, which are both required to produce corrugated board. Linerboard is a flat layer of board, which can be further distinguished in kraftliner and testliner, depending on whether it is of virgin or recycled origin, respectively. Fluting medium is the corrugated middle layer between a top and bottom layer of linerboard. Together all three layers constitute corrugated board. Virgin fluting medium is commonly called semichemical fluting, while recycled fluting can also be called wellenstoff.;imageUrlTagReplacefb7c96f2-1933-4a81-a33a-515d0a5fb151 The activity starts at the gate of the corrugated box board factory. The activity ends at the gate of the using entity. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/1190f618-587e-461d-829e-8e7cf9380cb0/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 2	Polietilene
Provider	market for polyethylene, high density, granulate polyethylene, high density, granulate Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'polyethylene, high density, granulate', in the Global geography.;In this market, expert judgement was used to develop product specific transport distance estimations.;'polyethylene, high density, granulate', is a plastic product of fossil origin, it is not biodegradable and it is a thermoplastic material. This product consists of 100% virgin material with no content of recycled material. The product is used in the following applications and sectors:

	packaging material including crates, trays, bottles, food packaging, jerry cans, drums, industrial bulk containers etc, food containers, toys, petrol tanks, industrial wrapping and film, fibres and textiles like in ropes, fishing and sport nets, nets for agricultural use, industrial and decorative fabrics, pipes, wiring and cables. This activity starts at the gate of the activities that produce 'polyethylene, high density, granulate', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'polyethylene, high density, granulate', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/716baf6b-d697-49b2-a256-4d9cdb585b91/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 3	Polistirene
Provider	market for polystyrene, high impact polystyrene, high impact Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'polystyrene, high impact', in the Global geography.;In this market, expert judgement was used to develop product specific transport distance estimations.;'polystyrene, high impact', is a plastic product of fossil origin, it is not biodegradable and it is a thermoplastic material. This product consists of 100% virgin material with no content of recycled material. The product is used in the following applications and sectors: many applications such as food and non-food packaging, disposable cups and cutlery, furniture, toys and consumer goods, as well as electronics and appliances. It is also used to make engineering resin blends with polyphenylene oxide for the automotive industry, electrical appliances, and electronics. This activity starts at the gate of the activities that produce 'polystyrene, high impact', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'polystyrene, high impact', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/43bfa25f-6e01-4a19-99ca-4978b1f4e0b2/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce

5.3.1.6 Trasporto

La tipologia di veicoli coinvolti nel trasporto è stata valutata da dati di letteratura per strutture di sostegno per tetti. Il peso di materiali trasportati è dato dalla somma degli elementi che compongono la struttura e il loro packaging. Il trasporto è stato modellizzato da provider generici da database, Tabella 21.

Tabella 21 Input per la modellizzazione del trasporto.

Trasporto																
Flusso 1	Trasporto via camion															
Provider	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cutoff, U - RER															
Descrizione	This dataset represents the service of 1tkm freight transport in a lorry of the size class 16-32 metric tons gross vehicle weight (GVW) and Euro VI emissions class. The transport datasets refer to the entire transport life cycle i.e. to the construction, operation, maintenance and end of life of vehicle and road infrastructures. Fuel consumption and emissions are for average European journeys and load factors and not representative of a specific transport scenario. The average load factors are taken from the Tremove model v2.7b (2009) and EcoTransIT (2011) report. These are as follows; <table><tr><th>Lorry size class</th><th>Average load factor</th><th>GVW</th></tr><tr><td>3.5-7.5t</td><td>0.98t</td><td>4.98t</td></tr><tr><td>7.5-16t</td><td>3.29t</td><td>9.29t</td></tr><tr><td>16-32t</td><td>15.79t</td><td>15.96t</td></tr><tr><td>>32t</td><td>29.96t</td><td></td></tr></table> The lorry size and load factor determines the GVW and therefore also the fuel consumption and amount of both exhaust and non-exhaust emissions. Non-exhaust emissions are those resulting from tyre, brake and road wear; Fuel consumption and exhaust emissions are taken from v3.1 of the HBEFA model, using the data for Germany and without applying model weighting. There are a higher number of size categories used in HBEFA than in ecoinvent and so the data are grouped in order to fit the lorry size classes used in ecoinvent. The selective catalytic reduction (SCR) technology is around 3 times more common than that of exhaust gas recovery (EGR) as an emissions reduction measure and so the emission factors given in the dataset are weighted to reflect this. The data for the HBEFA categories SCR* and VI* were disregarded. The exhaust emissions caused by the burning of fuel are either fuel dependent (fuel type and quantity) or Euro class dependent. The latter reflect the emission regulations to which the vehicle complies. Regulated emissions are CO, NOx, particulate matter (PM) and total hydrocarbons (HC). Data from the Emissions Inventory Guidebook (EMEP/EEA, 2013) were used for specific exhaust emissions not covered by the HBEFA model; Non-exhaust emissions are accounted for as weight dependent by-products and exist as separate datasets; For road infrastructure the expenditures and	Lorry size class	Average load factor	GVW	3.5-7.5t	0.98t	4.98t	7.5-16t	3.29t	9.29t	16-32t	15.79t	15.96t	>32t	29.96t	
Lorry size class	Average load factor	GVW														
3.5-7.5t	0.98t	4.98t														
7.5-16t	3.29t	9.29t														
16-32t	15.79t	15.96t														
>32t	29.96t															

	environmental interventions due to construction of roads have been allocated based on the gross tonne kilometer performance. Expenditures due to operation of the road infrastructure, as well as land use have been allocated based on the yearly vehicle kilometer performance. The same assumption on vehicle lifetime performance has been transferred from the ecoinvent v2 datasets of 540 000 km/vehicle. The production, maintenance and disposal of the vehicle are as reported in the ecoinvent (2007) report on transport services. ;Main data sources;;De Ceuster, G., et al. (2009) TREMOVE: Final Report. Model code v2.7b, 2009. European Commission, Brussels.;Keller, M. et al. (2010) Handbook emission factors for road transport v3.1, HBEFA. INFRAS, Berne, CH. ;Knörr, W. et al. (2011) Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports (EcoTransIT): Methodology and data update. Berlin, Hannover, Heidelberg, DE.;Ntziachristos, L., et al. (2013) EMEP/EEA air pollutant emissions inventory guidebook 2009: Exhaust emissions from road transport. European Environment Agency, Copenhagen, DK.;Spielmann, M., et al. (2007) Transport Services. ecoinvent report No. 14., Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. From combustion of fuel in the engine. The dataset takes as input the infrastructure of the lorry and road network, the materials and efforts needed for maintenance of these and the fuel consumed in the vehicle for the journey. The activity ends with the transport service of 1tkm and the emissions of exhaust and non-exhaust emissions into air, water and soil. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/5604bf2a-7b2a-495e-9671-6f1d4a78bdc2/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 2	Trasporto via treno
Provider	transport, freight train transport, freight train Cutoff, U - IT
Descrizione	The dataset represents the entire transport life cycle of a freight train in Italy. The data of the energy use and operation emissions are average data for the operation of goods transportation by rail in Italy. The data has been determined top down, by combining the total yearly energy consumption and the yearly tkm-performance of goods transportation. The dataset starts with the production of a locomotive. The dataset ends with the service of transporting 1 ton over a distance of 1 km by a freight train. The dataset includes the production and the maintenance of the locomotive and the goods wagon, the construction of the railway track and the energy use and operation emissions of a freight train using diesel and electricity. The inventory includes as well the actual energy consumption for an average goods train (1023Gt) in Italian using electro and diesel energy. In addition, the diesel consumption and

	emissions of shunting processes are accounted for. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/0d5a9a63-f10a-4a60-afdd-0b1b01bba4d9/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 3	Trasporto via autovettura
Provider	transport, freight, light commercial vehicle transport, freight, light commercial vehicle Cutoff, U - Europe without Switzerland
Descrizione	Inventory refers to the entire transport life cycle. For road infrastructure, expenditures and environmental interventions due to construction of roads have been allocated based on the Gross tonne kilometre performance. Expenditures due to operation of the road infrastructure, as well as land use have been allocated based on the yearly vehicle kilometre performance. For the attribution of vehicle share to the transport performance a vehicle life time performance of 2.39E05 pkm/vehicle has been assumed. The data of the energy use and combustion emissions are average data for the operation of an average Swiss van (fleet average) in the year 2005, comprising various emission technologies. operation of vehicle; production and maintenance of vehicles; construction of road. In the energy use and combustion emissions dataset, fuel consumption is included. Direct airborne emissions of gaseous substances, particulate matters and heavy metals are accounted for. Particulate emissions comprise exhaust- and abrasions emissions. Heavy metal emissions to soil and water caused by tyre abrasion are included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/db1b1329-f664-42df-9f7e-a23217095167/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce

5.3.1.7 Fine vita

La fase di fine vita del sistema ancorato a tetto spiovente è stata modellizzata fino ai cancelli dell’impianto di separazione e trattamento preliminare e non specifico dei rifiuti. I consumi legati allo smantellamento nei suoi componenti non sono stati considerati. La modellizzazione usa provider generici da database, Tabella 22.

Tabella 22 Input per la modellizzazione della separazione e disassemblaggio dei rifiuti.

Separazione e disassemblaggio	
Flusso 1	Fine vita barre di alluminio
Provider	treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting Cutoff, U - RER
Descrizione	This dataset is based on two sources: the European Aluminium Association 2005 LCI data (EAA, 2008); and (2) the

	ecoinvent v2.2 dataset for the same activity (Althaus, 2009), itself largely based on EAA data from 2000. Priority was given to data contained in EAA (2008); Althaus (2009) was used only in cases where it was found to be more complete than EAA (2008).;Note that EAA only obtained 2005 input and output data for wrought aluminium shredding and de-laquering. Other activities (cast alloy shredding, sink and float, cutting and baling, drying and deoiling and dismantling) were characterized using 1998 data, thought to be largely representative of activities in 2005. The different activities were scaled using scrap make-up data representative of 2005.;Note that the prepared scrap output has been renamed from "aluminium scrap, post-consumer, prepared for remelting" to "aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling" since the prepared scrap is treated downstream in both refining and remelting activities. Scrap preparation begins with the receiving of post-consumer aluminium scrap. This scrap can come from very diverse sources, e.g. motor block engines, used beverage cans, facade panel, etc. The actual activities associated with scrap preparation will depend on the scrap nature and can include shredding, sink and float, cutting and baling, drying and de-oiling, de-laquering, dismantling. Some scrap requires no preparation whatsoever. This dataset represents the inputs and outputs for the preparation of averaged scrap and hence may not be representative of inputs and outputs associated with any particular type of scrap. For more information on the shares of scrap types and types of treatment activities included in this dataset, please refer to EAA 2008. The activity ends with the supply of post-consumer aluminium scrap ready to be recycled. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/769288bc-6ecd-4131-bd65-abb963e3a785/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 2	Fine vita componenti acciaio
Provider	treatment of waste reinforcement steel, sorting plant waste reinforcement steel Cutoff, U - RoW
Descrizione	The waste contains 1kg steel (GSD=100%). Waste density is 7900 kg/m3. ;[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database.

	The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] energy for dismantling, machines for handling in sorting plant, electricity demand for sorting plant, transport to dismantling facilities, Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/3cd2f704-4eb8-49c9-b43b-e45ead7c85e2/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 3	Fine vita zavorra cemento
Provider	treatment of waste concrete, not reinforced, sorting plant waste concrete, not reinforced Cutoff, U - Europe without Switzerland
Descrizione	The waste contains 1kg inert material (GSD=100%). Waste density is 2200 kg/m3. energy for dismantling, particulate matter emissions from dismantling and handling, machines for handling in sorting plant, electricity demand for sorting plant, transport to dismantling facilities, final disposal of waste material, Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/4ec6b187-180e-4aa8-9e3e-0298ba0a5c65/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 4	Fine vita inverter 10 kW
Provider	treatment of electronics scrap from control units electronics scrap from control units Cutoff, U - RER
Descrizione	The dismantled control unit has a composition of 46% steel (housing), 32% plastics, 14% printed wiring boards and 8% cables (various types).;[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] This module includes the dismantling of the electronic control equipment. The included processes are: transport to dismantling site and dismantling. The further treatment itself is not part of this dataset here. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/daa152c7-

	ff72-4f0d-bdf3-23c160527b58/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 5	Fine vita cavi elettrici
Provider	treatment of waste electric wiring, collection for final disposal waste electric wiring Cutoff, U - RoW
Descrizione	The waste contains 0.615kg cable insulation (GSD=101.1%) and 0.385kg copper (GSD=102.2%). Waste density is 4100 kg/m3. Allocation of energy production in waste incineration: no substitution or expansion. Total burden allocated to waste disposal function of waste incinerator.;[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] transport to dismantling facilities, final disposal of waste material, Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/9d68d46c-0491-4e02-ab4f-d19631b2df05/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 6	Fine vita cartone packaging
Provider	treatment of waste plaster-cardboard sandwich, sorting plant waste plaster-cardboard sandwich Cutoff, U - CH
Descrizione	The waste contains 0.834kg gypsum (GSD=100.4%) and 0.166kg cardboard (GSD=104.1%). Waste density is 1000 kg/m3. ;[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the

	ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] energy for dismantling, particulate matter emissions from dismantling and handling, machines for handling in sorting plant, electricity demand for sorting plant, transport to dismantling facilities, final disposal of waste material, Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/dc986db6-c12c-427f-a05c-dcf3d0e9c7/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 7	Fine vita polistirene packaging
Provider	treatment of waste plastic plaster, sorting plant waste plastic plaster Cutoff, U - CH
Descrizione	The waste contains 1kg plastic plaster (GSD=100%). Waste density is 1300 kg/m3. ;[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] particulate matter emissions from dismantling and handling, machines for handling in sorting plant, electricity demand for sorting plant, transport to dismantling facilities, final disposal of waste material, Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/22b1f302-64d3-4dc8-8572-757740c0c15c/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 8	Fine vita polietilene packaging
Provider	treatment of waste polyethylene, for recycling, unsorted, sorting waste polyethylene, for recycling, sorted Cutoff, U - Europe without Switzerland
Descrizione	The functional unit represents the treatment of unsorted waste polyethylene, for recycling, yielding 1 kg of sorted waste polyethylene, for recycling.; Once the postconsumer PET has been collected, they must be separated from other co-collected materials and plastics. Although some recovered plastic is separated by curbside sorting and the use of separate bins at drop-off recycling centers, sorting and separation of plastics most commonly takes place at material recovery facilities (MRFs). Sorting operations at MRFs range

	from manual sorting of items on a conveyor to highly automated systems using magnets, air classifiers, optical sorters, and other technologies to sort and separate mixed incoming materials. Postconsumer plastics may be separated and baled as mixed plastics, or the facility may have the capability to further sort down to individual resin bales. Service is starting with the receipt of unsorted waste PE This module includes all processes of the sorting of waste PE up to the factory gate. Machinery infrastructure is excluded no allocation involved Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/6ec780e2-c9f1-44a3-b2e1-141668e37f80/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
--	--

5.4 Sistema ancorato a tetto piano

Il sistema ancorato a tetto piano è stato modellizzato basandosi su dati presenti in letteratura come riportato in Tabella 23.

Tabella 23 Inventario del sistema ancorato a tetto piano.

Componenti	Quantità
Alluminio	105.6 kg
Acciaio	11.3 kg
Polietilene ad alta densità	80.4 kg
Moduli fotovoltaici monofacciali	18 moduli
Cavi Elettrici	96.5 metri / 36.7 kg
Invertitore DC/AC 10 kWh	74 kg
Cartone ondulato	0.8 kg
Polistirene	0.3 kg
Trasporto	Distanza
Camion	50 km
Treno	200 km
Autovettura	100 km

5.4.1 Input e assunzioni

5.4.1.1 Barre cave di alluminio

La struttura di supporto è stata considerata formata da barre di alluminio. La quantità di acciaio necessaria a sostenere l'installazione di moduli fotovoltaici su un'area di 41.9 m² è stata valutata dai dati di inventario presenti in letteratura per una struttura montata su un tetto piano. Le barre sono state modellate assumendo come materia prima una lega generica di alluminio adatto all'estrusione proveniente da fonti diverse, soggetta a ulteriori processi di lavorazione generica dell'alluminio e estrusione in barre cave. Il processo per la produzione di barre cave di alluminio è stato modellato attraverso i seguenti flussi in input, descritti in Tabella 24.

Tabella 24 Input per la modellizzazione di barre cave di alluminio.

Barre cave di alluminio	
Flusso 1	aluminium,wrought alloy
Provider	market for aluminium, wrought alloy aluminium, wrought alloy Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'aluminium, wrought alloy', in the Global geography.;In this market, expert judgement was used to develop product specific transport distance estimations. This activity starts at the gate of the activities that produce 'aluminium, wrought alloy', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'aluminium, wrought alloy', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/946ecb91-72e1-412b-933a-ca21c5ca69e4/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 2	metal working, average for aluminium product manufacturing
Provider	market for metal working, average for aluminium product manufacturing metal working, average for aluminium product manufacturing Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'metal working, average for aluminium product manufacturing', in the Global geography.;Transport from producers to consumers of this product in the geography covered by the market is included.;This is delivering the service of 'metal working, average for aluminium product manufacturing'. The dataset represents average manufacturing processes to make a semi-manufactured aluminium product into a final product. The service includes machinery, infrastructure, metal operations and additional aluminium input to consider for the processing losses, but it excludes the main aluminium

	input and the process of degreasing. This activity starts with the service generation.
Flow 3	section bar extrusion, aluminium
Provider	market for section bar extrusion, aluminium section bar extrusion, aluminium Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'section bar extrusion, aluminium', in the Global geography.;Transport from producers to consumers of this product in the geography covered by the market is included. This activity starts at the gate of the activities that produce 'section bar extrusion, aluminium', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'section bar extrusion, aluminium', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/2a0ca3ee-166b-4326-9caa-0baa4eabf033/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce

5.4.1.2 Componenti in acciaio

In assenza di dati primari la quantità di acciaio presente nel sistema ancorato a tetto piano è stata stimata da dati presenti in letteratura per strutture di supporto per moduli fotovoltaici. I componenti sono modellati assumendo come materia prima acciaio basso legato, soggetta a ulteriori processi di lavorazione generica dell'acciaio e laminazione in fogli. Il processo per la produzione di componenti in acciaio è stato modellato attraverso i seguenti flussi in input, descritti in Tabella 25.

Tabella 25 Input per la modellizzazione di componenti in acciaio.

Componenti in acciaio	
Flusso 1	steel, low-alloyed
Provider	market for steel, low-alloyed steel, low-alloyed Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'steel, low-alloyed', in the Global geography.;Transport distances are based on the

	ecoinvent "Default Transport Assumptions" model, accessible on the ecoinvent website. At the gate of the steelmaking plant with the collection of the steel, low-alloyed for distribution. At the gate of the manufacturing plant with the cast steel ready for use. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/3b94d9bf-56fd-4e55-8648-d3347bd5b3b2/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 2	metal working, average for steel product manufacturing
Provider	market for metal working, average for steel product manufacturing metal working, average for steel product manufacturing Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'metal working, average for steel product manufacturing', in the Global geography.;Transport from producers to consumers of this product in the geography covered by the market is included.;This is delivering the service of 'metal working, average for steel product manufacturing'. The dataset represents average manufacturing processes to make a semi-manufactured steel product into a final product. The service includes machinery, infrastructure, metal operations and additional steel input to consider for the processing losses, but it excludes the main steel input and the process of degreasing. This activity starts with the service generation. This activity ends with the service supplied to its consumers. Transport or losses are considered irrelevant for this product. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/9f9c9676-2d88-4578-a92f-ed9f58e5a23a/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flow 3	sheet rolling, steel
Provider	market for sheet rolling, steel sheet rolling, steel Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'sheet rolling, steel', in the Global geography.;Transport from producers to consumers of

	this product in the geography covered by the market is included.;This is delivering the service of 'sheet rolling, steel'. For the applications that the products of hot rolling are unsatisfactory, e.g., with respect to cross section, surface quality, dimensional accuracy, and general finish, this service can be used. It is based on cold rolling while the end product has high quality surface finish and precise metallurgical properties for use in high specification purposes. This service is to be used only for un- and low-alloyed steel. The metal input is not included in this dataset. Thus, this service should be used along with 1 kg of steel. The exterior finish of rolled steel is very desirable when aesthetics and visual appeal are a priority. Thus, it used in applications like strips, bars, rods, home appliances, roof and wall systems, metal furniture, aerospace structural members, etc. This activity starts with the service generation. This activity ends with the service supplied to its consumers. Transport or losses are considered irrelevant for this product. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/71adbd59-5409-4428-afe4-949ac9586c84/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
--	--

5.4.1.3 Supporto in polietilene ad alta densità

In assenza di dati primari la quantità di polietilene presente nel sistema ancorato a tetto piano è stata stimata da dati presenti in letteratura per strutture di supporto per moduli fotovoltaici. Il polietilene funge da superficie di appoggio per il sistema integrandolo al tetto e fornendo l'ancoraggio necessario. Il polietilene è stato modellizzato attraverso i seguenti flussi in input, descritti in Tabella 26.

Tabella 26 Input per la modellizzazione del supporto in polietilene ad alta densità.

Componenti in acciaio	
Flusso 1	steel, low-alloyed
Provider	market for steel, low-alloyed steel, low-alloyed Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'steel, low-alloyed', in the Global geography.;Transport distances are based on the ecoinvent "Default Transport Assumptions" model, accessible on the ecoinvent website. At the gate of the steelmaking plant with the collection of the steel, low-alloyedl for distribution. At the gate of the manufacturing plant with the cast steel ready for use. Dataset

	documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/3b94d9bf-56fd-4e55-8648-d3347bd5b3b2/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
--	---

5.4.1.4 Cavi elettrici

I cavi elettrici sono stati modellizzati da dati di letteratura che descrivono l'inventario di strutture di sostegno per installazione su tetti. La lunghezza tipica dei cavi elettrici impiegati è di 2.3 metri per metro quadro di modulo fotovoltaico installato, con un peso stimato di 0.38 kg per metro di cavo. I cavi elettrici sono modellizzati usando un provider generico da database per cavi a tre fili, Tabella 27

Tabella 27 Input per la modellizzazione dei cavi elettrici.

Flusso	Cavi elettrici a tre fili
Provider	market for cable, three-conductor cable cable, three-conductor cable Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'cable, three-conductor cable', in the Global geography.;In this market, expert judgement was used to develop product specific transport distance estimations. This activity starts at the gate of the activities that produce 'cable, three-conductor cable', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'cable, three-conductor cable', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/a63c7596-a6ca-47d2-8c50-633f6887df29/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce

5.4.1.5 Inverter

L'inverter è necessario per trasformare l'energia elettrica prodotta dalla pensilina fotovoltaica da corrente elettrica continua ad alternata prima dell'immissione nel sistema elettrico. Poiché la potenza nominale installata per pensilina fotovoltaica è stata stimata di 9.04 kWp, l'inverter è stato modellizzato considerando 4 inverter da 2.5 kW usando un provider generico da database, Tabella 28.

Tabella 28 Input per la modellizzazione di inverter da 10 kW.

Flusso	Inverter da 10 kW (4 inverter da 2.5 kW)
Provider	market for inverter, 2.5kW inverter, 2.5kW Cutoff, U - GLO

Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'inverter, 2.5kW', in the Global geography.;Transport from producers to consumers of this product in the geography covered by the market is included.;This is a mobile infrastructure, representing the product of an inverter that is used to convert direct current voltage to alternating current voltage in common appliances. It has a total mass about 18.5 kg and a capacity of 2.5kW. Its production represents all materials necessary to construct it, energy consumption during manufacturing, packaging and end-of-life. This activity starts at the gate of the activities that produce 'inverter, 2.5kW', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'inverter, 2.5kW', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/c37ec386-980d-4185-bc2d-d9dd1b75b798/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
-------------	--

5.4.1.6 Packaging

Il packaging per la struttura, in quanto per i moduli fotovoltaici è stato già considerato nelle dichiarazioni di prodotto ambientale, è stato modellizzato considerando l'utilizzo maggiore riportato in letteratura per strutture di sostegno per tetti. Il packaging è composto da cartone ondulato, polietilene e polistirene, utilizzando provider generici da database, Tabella 29.

Tabella 29 Input modellizzazione del packaging.

Packaging	
Flusso 1	Cartone ondulato
Provider	market for corrugated board box corrugated board box Cutoff, U - RER
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This dataset represents the average transport of corrugated board boxes in the European market. Corrugated board boxes are commonly not traded globally but rather on regional/local markets. This dataset therefore represents the

	market for such boxes in Europe. Transport distances and modes were estimated. Losses are assumed negligible for this type of product.;Containerboard is the umbrella term for two different types of board, linerboard and fluting medium, which are both required to produce corrugated board. Linerboard is a flat layer of board, which can be further distinguished in kraftliner and testliner, depending on whether it is of virgin or recycled origin, respectively. Fluting medium is the corrugated middle layer between a top and bottom layer of linerboard. Together all three layers constitute corrugated board. Virgin fluting medium is commonly called semichemical fluting, while recycled fluting can also be called wellenstoff.;imageUrlTagReplacefb7c96f2-1933-4a81-a33a-515d0a5fb151 The activity starts at the gate of the corrugated box board factory. The activity ends at the gate of the using entity. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/1190f618-587e-461d-829e-8e7cf9380cb0/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 2	Polistirene
Provider	market for polystyrene, high impact polystyrene, high impact Cutoff, U - GLO
Descrizione	This is a market activity. Each market represents the consumption mix of a product in a given geography, connecting suppliers with consumers of the same product in the same geographical area. Markets group the producers and also the imports of the product (if relevant) within the same geographical area. They also account for transport to the consumer and for the losses during that process, when relevant.;This is the market for 'polystyrene, high impact', in the Global geography.;In this market, expert judgement was used to develop product specific transport distance estimations.;'polystyrene, high impact', is a plastic product of fossil origin, it is not biodegradable and it is a thermoplastic material. This product consists of 100% virgin material with no content of recycled material. The product is used in the following applications and sectors: many applications such as food and non-food packaging, disposable cups and cutlery, furniture, toys and consumer goods, as well as electronics and appliances. It is also used to make engineering resin blends with polyphenylene oxide for the automotive industry, electrical appliances, and electronics. This activity starts at the gate of the activities that produce 'polystyrene, high impact', within the geography of Global. This activity ends with the supply of 'polystyrene, high impact', to the consumers of this product. Transport is included. Product losses during transportation are assumed negligible and are therefore not included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/43bfa25f-

	6e01-4a19-99ca-4978b1f4e0b2/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
--	--

5.4.1.7 Trasporto

La tipologia di veicoli coinvolti nel trasporto è stata valutata da dati di letteratura per strutture di sostegno per tetti. Il peso di materiali trasportati è dato dalla somma degli elementi che compongono la struttura e il loro packaging. Il trasporto è stato modellizzato da provider generici da database, Tabella 30.

Tabella 30 Input per la modellizzazione del trasporto.

Trasporto																
Flusso 1	Trasporto via camion															
Provider	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cutoff, U - RER															
Descrizione	This dataset represents the service of 1tkm freight transport in a lorry of the size class 16-32 metric tons gross vehicle weight (GVW) and Euro VI emissions class. The transport datasets refer to the entire transport life cycle i.e. to the construction, operation, maintenance and end of life of vehicle and road infrastructures. Fuel consumption and emissions are for average European journeys and load factors and not representative of a specific transport scenario. The average load factors are taken from the Tremove model v2.7b (2009) and EcoTransIT (2011) report. These are as follows; <table><tr><td>Lorry size class</td><td>Average load factor</td><td>GVW</td></tr><tr><td>3.5-7.5t</td><td>0.98t</td><td>4.98t</td></tr><tr><td>7.5-16t</td><td>3.29t</td><td>9.29t</td></tr><tr><td>16-32t</td><td>15.79t</td><td>15.96t</td></tr><tr><td>>32t</td><td>29.96t</td><td></td></tr></table> The lorry size and load factor determines the GVW and therefore also the fuel consumption and amount of both exhaust and non-exhaust emissions. Non-exhaust emissions are those resulting from tyre, brake and road wear; Fuel consumption and exhaust emissions are taken from v3.1 of the HBEFA model, using the data for Germany and without applying model weighting. There are a higher number of size categories used in HBEFA than in ecoinvent and so the data are grouped in order to fit the lorry size classes used in ecoinvent. The selective catalytic reduction (SCR) technology is around 3 times more common than that of exhaust gas recovery (EGR) as an emissions reduction measure and so the emission factors given in the dataset are weighted to reflect this. The data for the HBEFA categories SCR* and VI* were disregarded. The exhaust emissions caused by the burning of fuel are either fuel dependent (fuel type and quantity) or Euro class dependent. The latter reflect the emission regulations to which the vehicle complies. Regulated emissions are CO, NOx, particulate matter (PM) and total hydrocarbons (HC). Data from the Emissions Inventory Guidebook (EMEP/EEA, 2013) were used for specific exhaust emissions not covered by the	Lorry size class	Average load factor	GVW	3.5-7.5t	0.98t	4.98t	7.5-16t	3.29t	9.29t	16-32t	15.79t	15.96t	>32t	29.96t	
Lorry size class	Average load factor	GVW														
3.5-7.5t	0.98t	4.98t														
7.5-16t	3.29t	9.29t														
16-32t	15.79t	15.96t														
>32t	29.96t															

	HBEFA model; Non-exhaust emissions are accounted for as weight dependent by-products and exist as separate datasets; For road infrastructure the expenditures and environmental interventions due to construction of roads have been allocated based on the gross tonne kilometer performance. Expenditures due to operation of the road infrastructure, as well as land use have been allocated based on the yearly vehicle kilometer performance. The same assumption on vehicle lifetime performance has been transferred from the ecoinvent v2 datasets of 540 000 km/vehicle. The production, maintenance and disposal of the vehicle are as reported in the ecoinvent (2007) report on transport services. ;Main data sources;;De Ceuster, G., et al. (2009) TREMOVE: Final Report. Model code v2.7b, 2009. European Commission, Brussels.;Keller, M. et al. (2010) Handbook emission factors for road transport v3.1, HBEFA. INFRAS, Berne, CH. ;Knörr, W. et al. (2011) Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports (EcoTransIT): Methodology and data update. Berlin, Hannover, Heidelberg, DE.;Ntziachristos, L., et al. (2013) EMEP/EEA air pollutant emissions inventory guidebook 2009: Exhaust emissions from road transport. European Environment Agency, Copenhagen, DK.;Spielmann, M., et al. (2007) Transport Services. ecoinvent report No. 14., Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. From combustion of fuel in the engine. The dataset takes as input the infrastructure of the lorry and road network, the materials and efforts needed for maintenance of these and the fuel consumed in the vehicle for the journey. The activity ends with the transport service of 1tkm and the emissions of exhaust and non-exhaust emissions into air, water and soil. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/5604bf2a-7b2a-495e-9671-6f1d4a78bdc2/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 2	Trasporto via treno
Provider	transport, freight train transport, freight train Cutoff, U - IT
Descrizione	The dataset represents the entire transport life cycle of a freight train in Italy. The data of the energy use and operation emissions are average data for the operation of goods transportation by rail in Italy. The data has been determined top down, by combining the total yearly energy consumption and the yearly tkm-performance of goods transportation. The dataset starts with the production of a locomotive. The dataset ends with the service of transporting 1 ton over a distance of 1 km by a freight train. The dataset includes the production and the maintenance of the locomotive and the goods wagon, the construction of the railway track and the energy use and operation emissions of a freight train using diesel and electricity.

	The inventory includes as well the actual energy consumption for an average goods train (1023Gt) in Italian using electro and diesel energy. In addition, the diesel consumption and emissions of shunting processes are accounted for. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/0d5a9a63-f10a-4a60-afdd-0b1b01bba4d9/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 3	Trasporto via autovettura
Provider	transport, freight, light commercial vehicle transport, freight, light commercial vehicle Cutoff, U - Europe without Switzerland
Descrizione	Inventory refers to the entire transport life cycle. For road infrastructure, expenditures and environmental interventions due to construction of roads have been allocated based on the Gross tonne kilometre performance. Expenditures due to operation of the road infrastructure, as well as land use have been allocated based on the yearly vehicle kilometre performance. For the attribution of vehicle share to the transport performance a vehicle life time performance of 2.39E05 pkm/vehicle has been assumed. The data of the energy use and combustion emissions are average data for the operation of an average Swiss van (fleet average) in the year 2005, comprising various emission technologies. operation of vehicle; production and maintenance of vehicles; construction of road. In the energy use and combustion emissions dataset, fuel consumption is included. Direct airborne emissions of gaseous substances, particulate matters and heavy metals are accounted for. Particulate emissions comprise exhaust- and abrasions emissions. Heavy metal emissions to soil and water caused by tyre abrasion are included. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/db1b1329-f664-42df-9f7e-a23217095167/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce

5.4.1.8 Fine vita

La fase di fine vita del sistema ancorato a tetto piano è stata modellizzata fino ai cancelli dell’impianto di separazione e trattamento preliminare e non specifico dei rifiuti. I consumi legati allo smantellamento nei suoi componenti non sono stati considerati. La modellizzazione usa provider generici da database, Tabella 31.

Tabella 31 Input per la modellizzazione della separazione e disassemblaggio dei rifiuti.

Separazione e disassemblaggio	
Flusso 1	Fine vita barre di alluminio

Provider	treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting Cutoff, U - RER
Descrizione	This dataset is based on two sources: the European Aluminium Association 2005 LCI data (EAA, 2008); and (2) the ecoinvent v2.2 dataset for the same activity (Althaus, 2009), itself largely based on EAA data from 2000. Priority was given to data contained in EAA (2008); Althaus (2009) was used only in cases where it was found to be more complete than EAA (2008).; Note that EAA only obtained 2005 input and output data for wrought aluminium shredding and de-laquering. Other activities (cast alloy shredding, sink and float, cutting and baling, drying and deoiling and dismantling) were characterized using 1998 data, thought to be largely representative of activities in 2005. The different activities were scaled using scrap make-up data representative of 2005.;Note that the prepared scrap output has been renamed from "aluminium scrap, post-consumer, prepared for remelting" to "aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling" since the prepared scrap is treated downstream in both refining and remelting activities. Scrap preparation begins with the receiving of post-consumer aluminium scrap. This scrap can come from very diverse sources, e.g. motor block engines, used beverage cans, facade panel, etc. The actual activities associated with scrap preparation will depend on the scrap nature and can include shredding, sink and float, cutting and baling, drying and de-oiling, de-laquering, dismantling. Some scrap requires no preparation whatsoever. This dataset represents the inputs and outputs for the preparation of averaged scrap and hence may not be representative of inputs and outputs associated with any particular type of scrap. For more information on the shares of scrap types and types of treatment activities included in this dataset, please refer to EAA 2008. The activity ends with the supply of post-consumer aluminium scrap ready to be recycled. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/769288bc-6ecd-4131-bd65-abb963e3a785/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 2	Fine vita componenti acciaio
Provider	treatment of waste reinforcement steel, sorting plant waste reinforcement steel Cutoff, U - RoW
Descrizione	The waste contains 1kg steel (GSD=100%). Waste density is 7900 kg/m3. ;[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central

	changes described in the ecoinvent version 3 change report (http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] energy for dismantling, machines for handling in sorting plant, electricity demand for sorting plant, transport to dismantling facilities, Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/3cd2f704-4eb8-49c9-b43b-e45ead7c85e2/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 3	Fine vita zavorra cemento
Provider	treatment of waste concrete, not reinforced, sorting plant waste concrete, not reinforced Cutoff, U - Europe without Switzerland
Descrizione	The waste contains 1kg inert material (GSD=100%). Waste density is 2200 kg/m3. energy for dismantling, particulate matter emissions from dismantling and handling, machines for handling in sorting plant, electricity demand for sorting plant, transport to dismantling facilities, final disposal of waste material, Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/4ec6b187-180e-4aa8-9e3e-0298ba0a5c65/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 4	Fine vita inverter 10 kW
Provider	treatment of electronics scrap from control units electronics scrap from control units Cutoff, U - RER
Descrizione	The dismantled control unit has a composition of 46% steel (housing), 32% plastics, 14% printed wiring boards and 8% cables (various types).;[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] This module includes the dismantling of the

	electronic control equipment. The included processes are: transport to dismantling site and dismantling. The further treatment itself is not part of this dataset here. Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/daa152c7-ff72-4f0d-bdf3-23c160527b58/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 5	Fine vita cavi elettrici
Provider	treatment of waste electric wiring, collection for final disposal waste electric wiring Cutoff, U - RoW
Descrizione	The waste contains 0.615kg cable insulation (GSD=101.1%) and 0.385kg copper (GSD=102.2%). Waste density is 4100 kg/m3. Allocation of energy production in waste incineration: no substitution or expansion. Total burden allocated to waste disposal function of waste incinerator.;[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] transport to dismantling facilities, final disposal of waste material, Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/9d68d46c-0491-4e02-ab4f-d19631b2df05/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 6	Fine vita cartone packaging
Provider	treatment of waste plaster-cardboard sandwich, sorting plant waste plaster-cardboard sandwich Cutoff, U - CH
Descrizione	The waste contains 0.834kg gypsum (GSD=100.4%) and 0.166kg cardboard (GSD=104.1%). Waste density is 1000 kg/m3. ;[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/)]

	3/reports-of-changes/), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] energy for dismantling, particulate matter emissions from dismantling and handling, machines for handling in sorting plant, electricity demand for sorting plant, transport to dismantling facilities, final disposal of waste material, Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/dc986db6-c12c-427f-a05c-dcfcb3d0e9c7/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 7	Fine vita polistirene packaging
Provider	treatment of waste plastic plaster, sorting plant waste plastic plaster Cutoff, U - CH
Descrizione	The waste contains 1kg plastic plaster (GSD=100%). Waste density is 1300 kg/m3. ;[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.] particulate matter emissions from dismantling and handling, machines for handling in sorting plant, electricity demand for sorting plant, transport to dismantling facilities, final disposal of waste material, Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/22b1f302-64d3-4dc8-8572-757740c0c15c/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
Flusso 8	Fine vita polietilene packaging
Provider	treatment of waste polyethylene, for recycling, unsorted, sorting waste polyethylene, for recycling, sorted Cutoff, U - Europe without Switzerland
Descrizione	The functional unit represents the treatment of unsorted waste polyethylene, for recycling, yielding 1 kg of sorted waste polyethylene, for recycling.; Once the postconsumer PET has been collected, they must be separated from other

	co-collected materials and plastics. Although some recovered plastic is separated by curbside sorting and the use of separate bins at drop-off recycling centers, sorting and separation of plastics most commonly takes place at material recovery facilities (MRFs). Sorting operations at MRFs range from manual sorting of items on a conveyor to highly automated systems using magnets, air classifiers, optical sorters, and other technologies to sort and separate mixed incoming materials. Postconsumer plastics may be separated and baled as mixed plastics, or the facility may have the capability to further sort down to individual resin bales. Service is starting with the receipt of unsorted waste PE This module includes all processes of the sorting of waste PE up to the factory gate. Machinery infrastructure is excluded no allocation involved Dataset documentation: https://v391.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/6ec780e2-c9f1-44a3-b2e1-141668e37f80/290c1f85-4cc4-4fa1-b0c8-2cb7f4276dce
--	--

6. Risultati

6.1 Metodologia per la valutazione dell'impatto ambientale

La metodologia usata in questo studio e per i risultati riportati di seguito è "Environmental Footprint 3.1 EN15804".

6.2 Raccolta dei risultati ottenuti

Nella seguente sezione sono stati raccolti i risultati dello studio, partendo dalla descrizione dei risultati disponibili nelle dichiarazioni ambientali dei moduli fotovoltaici analizzati. Questi risultati sono stati poi trattati per evidenziare l'impatto ambientale dei moduli fotovoltaici in relazione ad alcune caratteristiche rilevante come materiale, struttura e tipologia monofacciale e bifacciale. Il profilo ambientale è stato dichiarato per unità di Watt picco, Wp, e per unità di chilowattora, kWh. Il tempo di raggiungimento della neutralità carbonica è stato valutato e confrontato per moduli fotovoltaici con la medesima struttura ma di diversa tipologia, sottolineando il guadagno bifacciale necessario al raggiungimento del tempo di pareggiamento dei moduli monofacciali.

Considerando un modulo fotovoltaico monofacciale con caratteristiche tecniche medie rispetto a quelle descritte dalle dichiarazioni ambientali di prodotto, sono stati modellati tre sistemi di produzione di energia elettrica da fotovoltaico. Per ciascuno servizio è stato descritto il profilo ambientale per unità di chilowatt ora. Il ruolo dei parametri di installazione quali orientamento e inclinazione è stato investigato, delineando il contributo di tali parametri al profilo ambientale e al tempo di raggiungimento della neutralità carbonica.

6.3 Profilo ambientale medio da dichiarazioni ambientali di prodotto

In questa sezione è stato riportato il profilo ambientale medio ottenuto dalle dichiarazioni ambientali di prodotto, indicando gli indici d'impatto per le 13 categorie d'impatto delle performance ambientali per ciascuna fase di vita considerata, Tabella 32. Gli indici di impatto ambientale sono stati definiti come media dei valori indicati nelle singole dichiarazioni ambientali per la fase di vita A (estrazione, produzione e assemblaggio) e C (fine vita) per l'unità funzionale di un watt picco (Wp).

Tabella 32 Indici di impatto ambientale medi definiti dalle dichiarazioni ambientali di prodotto per unità funzionale watt picco Wp.

Categoria d'impatto	Unità di misura	A	C	Totale	Contributo fase A	Contributo fase C
Riscaldamento Globale - totale	kg CO ₂ eq	5.49E-01	1.97E-02	5.69E-01	97%	3%
Riscaldamento Globale - Biogenico	kg CO ₂ eq	3.28E-03	7.97E-04	4.08E-03	80%	20%
Riscaldamento Globale - Fossile	kg CO ₂ eq	5.48E-01	1.89E-02	5.67E-01	97%	3%
Riscaldamento Globale - LULC	kg CO ₂ eq	5.17E-04	3.46E-05	5.52E-04	94%	6%
Consumo Ozono	kg CFC 11 eq	9.36E-08	1.53E-09	9.51E-08	98%	2%
Acidificazione	mol H ⁺ eq	3.71E-03	8.47E-05	3.79E-03	98%	2%
Eutrofizzazione – acque dolci	kg P eq	1.00E-04	3.34E-06	1.04E-04	97%	3%
Eutrofizzazione – acque marine	kg N eq	7.66E-04	2.39E-05	7.90E-04	97%	3%
Eutrofizzazione – terrestre	mol N eq	7.70E-03	2.11E-04	7.91E-03	97%	3%
Formazione fotochimica ozono	kg NMVOC eq	2.58E-03	6.37E-05	2.64E-03	98%	2%
Consumo abiotico – minerali e metalli	kg Sb eq	3.26E-05	5.79E-07	3.32E-05	98%	2%
Consumo abiotico - fossili	MJ/	6.29E+00	2.08E-01	6.50E+00	97%	3%
Consumo acqua	m ³	3.55E-01	5.79E-03	3.61E-01	98%	2%

La fase A relativa all'estrazione di materie prime, i differenti processi di lavorazione per ottenere il modulo fotovoltaico finito e l'assemblaggio finale nel sito di installazione contribuisce per più del 97% in 11 categorie su 13 all'impatto ambientale totale dei moduli fotovoltaici. Unicamente nel caso del Riscaldamento Globale - Biogenico, il contributo della fase A si attesta all'80% dell'impatto totale, mentre per l'indicatore Riscaldamento Globale – Land Use and Land Consumption raggiunge il 94%. La fase C relativa al disassemblaggio, trattamento e smaltimento, invece, contribuisce per 11 indicatori su 13 meno del 3% all'impatto totale. Per l'indicatore di Riscaldamento Globale – Biogenico e Riscaldamento Globale – LULC raggiunge rispettivamente il 20% e il 6%. Il profilo ambientale è riportato in Figura 4.

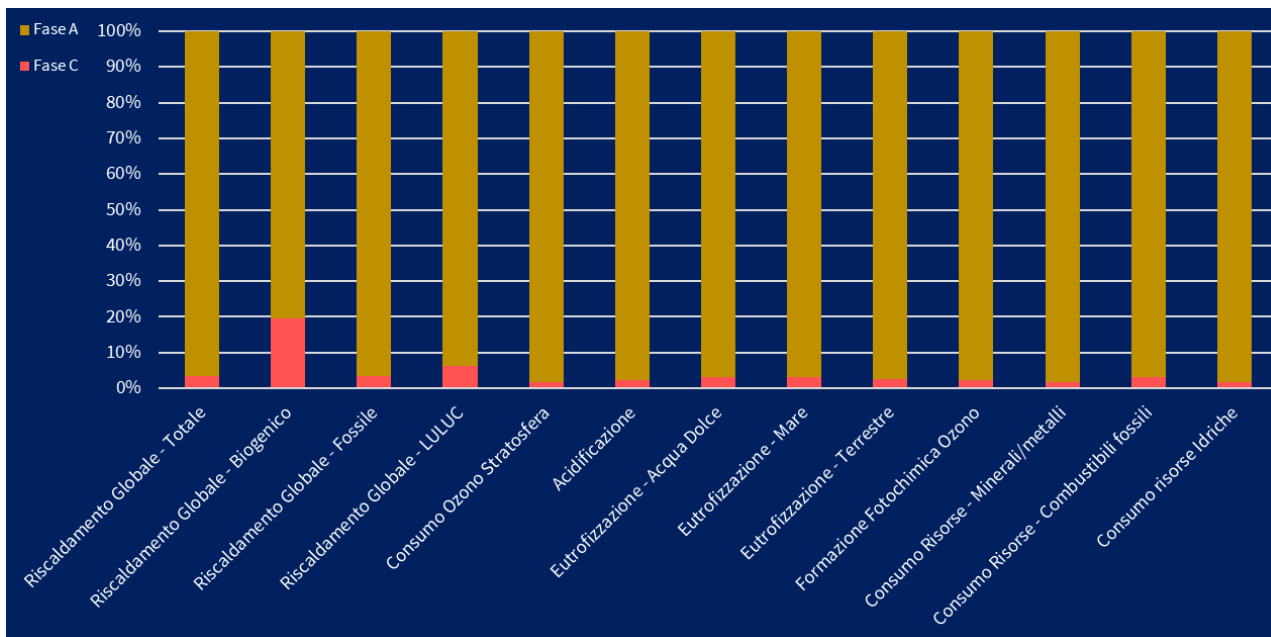


Figura 4 Profilo ambientale medio ottenuto dalle dichiarazioni ambientali di prodotto per moduli fotovoltaici.

6.4 Materiale dello strato di assorbimento: silicio e tellururo di cadmio

Sono stati poi analizzati e confrontati i profili ambientali distinguendo la natura chimica dei materiali che costituiscono lo strato di assorbimento della radiazione elettromagnetica, responsabile della generazione dei portatori di carica e quindi della produzione di energia elettrica. In commercio si distinguono celle solari contenenti silicio monocristallino drogato p o n, a seconda della struttura scelta per realizzarla. Oltre al silicio altri materiali sono impiegati per la produzione di celle solari, quali film sottili di CIS, Copper Indium Selenide, CIGS, Copper Indium Gallium Selenide, e CdTe, Cadmium Telluride. Compatibilmente con le dichiarazioni ambientali di prodotto rilasciate, è stato valutato il profilo ambientale medio di moduli fotovoltaici a base di silicio e tellururo di cadmio. Per il caso del silicio sono state considerate celle solari composte da silicio monocristallino e eterogiunzioni. Delle 41 certificazioni studiate, 39 fanno riferimento a moduli fotovoltaici a base di silicio, mentre solo 2 descrivono moduli fotovoltaici monofacciali a base di tellururo di cadmio. In Tabella 33, sono riportati gli indici di impatto medi suddivisi per fase di vita per i moduli fotovoltaici a base di silicio.

Tabella 33 Indici di impatto ambientale medi per moduli fotovoltaici a base di silicio definito dalle dichiarazioni ambientali di prodotto per unità funzionale watt picco Wp.

Categoria d'impatto	Unità di misura	A	C	Totale	Contributo fase A	Contributo fase C
Riscaldamento Globale - totale	kg CO ₂ eq	5.63E-01	1.76E-02	5.81E-01	97%	3%
Riscaldamento Globale - Biogenico	kg CO ₂ eq	3.42E-03	7.61E-04	4.18E-03	82%	18%
Riscaldamento Globale - Fossile	kg CO ₂ eq	5.62E-01	1.69E-02	5.79E-01	97%	3%
Riscaldamento Globale - LULUC	kg CO ₂ eq	5.26E-04	3.44E-05	5.61E-04	94%	6%
Consumo Ozono	kg CFC 11 eq	9.76E-08	1.29E-09	9.89E-08	99%	1%

Acidificazione	mol H+ eq	3.79E-03	8.09E-05	3.87E-03	98%	2%
Eutrofizzazione – acque dolci	kg P eq	1.05E-04	3.37E-06	1.08E-04	97%	3%
Eutrofizzazione – acque marine	kg N eq	7.85E-04	2.34E-05	8.08E-04	97%	3%
Eutrofizzazione – terrestre	mol N eq	7.85E-03	2.04E-04	8.06E-03	97%	3%
Formazione fotochimica ozono	kg NMVOC eq	2.64E-03	5.93E-05	2.70E-03	98%	2%
Consumo abiotico – minerali e metalli	kg Sb eq	3.25E-05	5.65E-07	3.31E-05	98%	2%
Consumo abiotico - fossili	MJ	6.44E+00	1.75E-01	6.61E+00	97%	3%
Consumo acqua	m³	3.70E-01	5.52E-03	3.76E-01	99%	1%

Gli indici di impatto ambientale per il caso dei moduli fotovoltaici a base di silicio sono simili a quelli riportati in Tabella 32, in quanto il profilo ambientale medio totale è descritto prevalentemente da moduli di silicio. In Figura 5, è riportato il profilo ambientale medio per i moduli fotovoltaici a base di silicio.

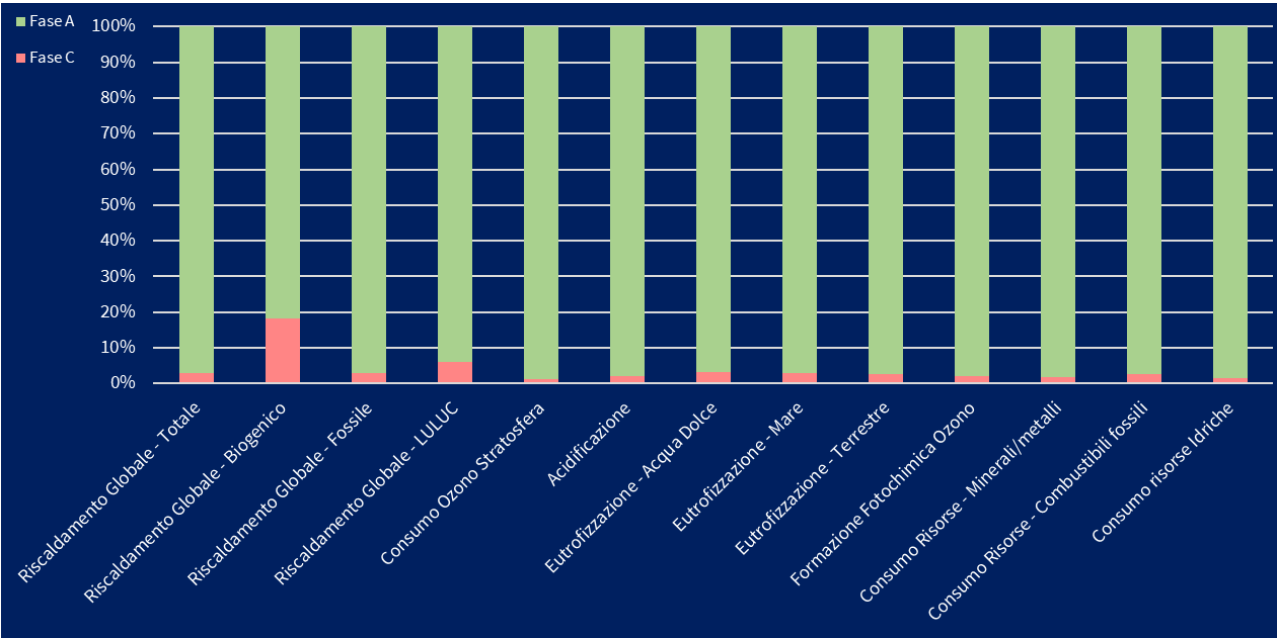


Figura 5 Profilo ambientale medio per i moduli fotovoltaici a base di silicio definito dalle dichiarazioni ambientali di prodotto.

In Tabella 34, sono riportati gli indici di impatto ambientale medi per i moduli fotovoltaici a film sottile di tellururo di cadmio.

Tabella 34 Indici di impatto ambientale medi per moduli fotovoltaici a base di tellururo di cadmio CdTe definito dalle dichiarazioni ambientali di prodotto unità funzionale watt picco Wp.

Categoria d'impatto	Unità di misura	A	C	Totale	Contributo fase A	Contributo fase C
Riscaldamento Globale - totale	kg CO ₂ eq	2.84E-01	6.05E-02	3.45E-01	82.5%	17.5%
Riscaldamento Globale - Biogenico	kg CO ₂ eq	5.99E-04	1.50E-03	2.10E-03	29%	71%
Riscaldamento Globale - Fossile	kg CO ₂ eq	2.83E-01	5.89E-02	3.42E-01	83%	17%
Riscaldamento Globale - LULC	kg CO ₂ eq	3.38E-04	3.94E-05	3.77E-04	90%	10%

Consumo Ozono	kg CFC 11 eq	1.56E-08	6.19E-09	2.18E-08	72%	28%
Acidificazione	mol H+ eq	2.17E-03	1.58E-04	2.32E-03	93%	7%
Eutrofizzazione – acque dolci	kg P eq	1.26E-05	2.77E-06	1.54E-05	82%	18%
Eutrofizzazione – acque marine	kg N eq	4.02E-04	3.33E-05	4.35E-04	92%	8%
Eutrofizzazione – terrestre	mol N eq	4.70E-03	3.53E-04	5.06E-03	93%	7%
Formazione fotochimica ozono	kg NMVOC eq	1.30E-03	1.50E-04	1.45E-03	90%	10%
Consumo abiotico – minerali e metalli	kg Sb eq	3.42E-05	8.44E-07	3.50E-05	98%	2%
Consumo abiotico - fossili	MJ	3.46E+00	8.52E-01	4.32E+00	80%	20%
Consumo acqua	m³	6.24E-02	1.10E-02	7.34E-02	85%	15%

Per i moduli fotovoltaici a base di tellururo di cadmio, la fase A contribuisce maggiormente alla definizione del profilo ambientale per 12 categorie su 13. Unicamente nel caso di Riscaldamento Globale – Biogenico la fase C di fine vita supera il contributo della fase A, diventando il principale driver all'impatto ambientale con un contributo pari al 71%. Rispetto agli indici riportati in Tabella 32, il contributo della fase A per 12 categorie su 13 è inferiore rispetto al profilo ambientale totale medio. L'indicatore Consumo abiotico – minerali e metalli è l'unica eccezione con un contributo pari al 98%. La fase di fine vita C, invece, contribuisce maggiormente alla delineazione del profilo ambientale raggiungendo un contributo del 71% e 28% rispettivamente per le categorie Riscaldamento Globale – Biogenico e Consumo Ozono. Il profilo ambientale per i moduli fotovoltaici a film sottile di tellururo di cadmio è riportato in Figura 6.

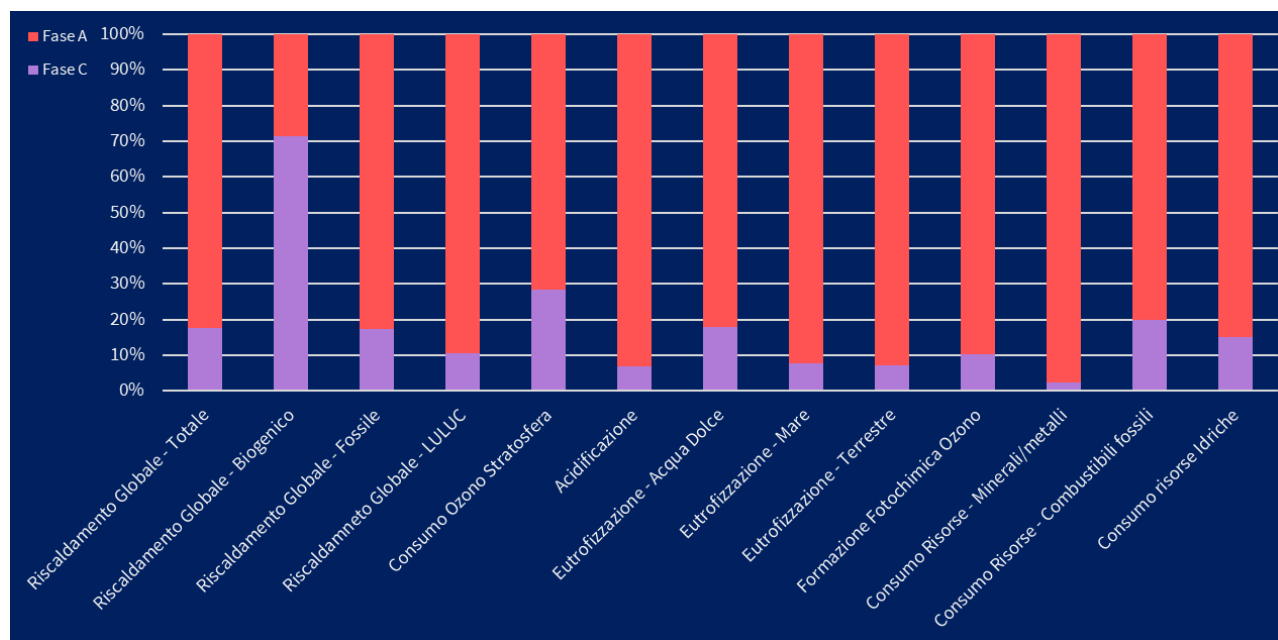


Figura 6 Profilo ambientale medio per i moduli fotovoltaici a base di tellururo di cadmio definito dalle dichiarazioni ambientali di prodotto.

Infine sono stati confrontati gli indici di impatto ambientale per i 13 indicatori tra i due materiali. In Tabella 35, sono riportati gli indici ambientale relativi alla fase A e C per i moduli fotovoltaici a base di silicio e tellururo di cadmio e la normalizzazione rispetto all'indice maggiore.

Tabella 35 Confronto tra Indici di impatto ambientale medi per moduli fotovoltaici a base di silicio e tellururo di cadmio CdTe definito dalle dichiarazioni ambientali di prodotto unità funzionale watt picco Wp.

Categoria d'impatto	Unità di misura	Silicio	CdTe	Norm. Si	Norm. CdTe
Riscaldamento Globale - totale	kg CO ₂ eq	5.81E-01	3.45E-01	100%	59%
Riscaldamento Globale - Biogenico	kg CO ₂ eq	4.18E-03	2.10E-03	100%	50%
Riscaldamento Globale - Fossile	kg CO ₂ eq	5.79E-01	3.42E-01	100%	59%
Riscaldamento Globale - LULC	kg CO ₂ eq	5.61E-04	3.77E-04	100%	67%
Consumo Ozono	kg CFC 11 eq	9.89E-08	2.18E-08	100%	22%
Acidificazione	mol H ⁺ eq	3.87E-03	2.32E-03	100%	60%
Eutrofizzazione - acque dolci	kg P eq	1.08E-04	1.54E-05	100%	14%
Eutrofizzazione - acque marine	kg N eq	8.08E-04	4.35E-04	100%	54%
Eutrofizzazione - terrestre	mol N eq	8.06E-03	5.06E-03	100%	63%
Formazione fotochimica ozono	kg NMVOC eq	2.70E-03	1.45E-03	100%	54%
Consumo abiotico - minerali e metalli	kg Sb eq	3.31E-05	3.50E-05	94%	100%
Consumo abiotico - fossili	MJ	6.61E+00	4.32E+00	100%	65%
Consumo acqua	m ³	3.76E-01	7.34E-02	100%	20%

Per tutte le categorie di impatto considerate, tranne Consumo abiotico - minerali e metalli, i moduli fotovoltaici a base di silicio hanno un impatto ambientale superiore a quello dichiarato per i moduli a base di tellururo di cadmio, i cui indici ambientali risultano essere largamente compresi tra il 50% e il 70% di quelli a base di silicio. Si evidenziano per l'indicatore Consumo Ozono, Eutrofizzazione - Acque dolci e Consumo Acqua i valori rispettivamente di 22%, 14% e 20% per i moduli a base di CdTe rispetto a quelli di silicio. In Figura 7, è stato rappresentato il confronto tra i profili ambientali dei moduli fotovoltaici a base di silicio e tellururo di cadmio.

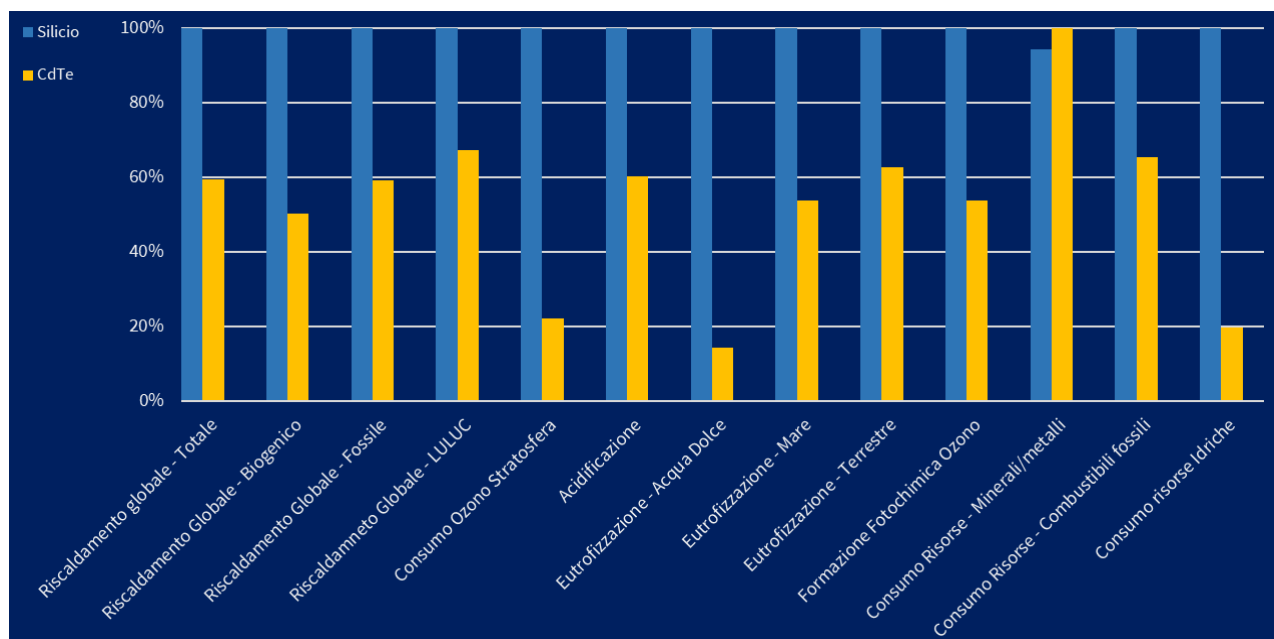


Figura 7 Confronto tra il profilo ambientale medio per i moduli fotovoltaici a base di silicio e tellururo di cadmio definito dalle dichiarazioni ambientali di prodotto.

6.5 Struttura della cella solare

6.5.1 Moduli fotovoltaici monofacciali

Per moduli fotovoltaici monofacciali, è stato possibile identificare dalle dichiarazioni ambientali di prodotto le seguenti strutture di celle solari e caratterizzare il profilo ambientale dei relativi moduli fotovoltaici:

1. Passivated Emitter Rear Contact (PERC)
2. Eterogiunzione (HJT)
3. Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon)
4. Film sottile di Tellururo di Cadmio (CdTe)
5. Hybrid Passivated Back Contact (HPBC)
6. All Back Contacts (ABC)

In Tabella 36, sono stati riportati gli indici di impatto ambientale medio per unità funzionale di Watt picco e kilowatt ora, distinguendo la struttura delle celle solari che compongono il modulo fotovoltaico. La produzione di energia elettrica è stata modellata secondo i parametri riportati in Tabella 2.

Tabella 36 Indici d'impatto ambientale per unità funzionale watt picco e kilowattora di moduli fotovoltaici monofacciali composti da diverse strutture di cella solare.

Passivated Emitter Rear Contact (PERC)							
Unità di misura	Categoria d'impatto	FU Wp			FU kWh		
		Fase A	Fase C	Tot.	Fase A	Fase C	Tot.
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	5.54E-01	1.87E-02	5.72E-01	1.63E-02	5.49E-04	1.69E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	3.85E-03	1.52E-03	5.37E-03	1.14E-04	4.47E-05	1.58E-04
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	5.50E-01	1.71E-02	5.67E-01	1.62E-02	5.05E-04	1.67E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	5.87E-04	4.87E-05	6.36E-04	1.73E-05	1.43E-06	1.87E-05
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	1.16E-07	1.81E-09	1.18E-07	3.43E-09	5.34E-11	3.48E-09
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	3.66E-03	8.27E-05	3.74E-03	1.08E-04	2.44E-06	1.10E-04
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	1.16E-04	6.08E-06	1.22E-04	3.42E-06	1.79E-07	3.60E-06
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	7.70E-04	1.73E-05	7.87E-04	2.27E-05	5.10E-07	2.32E-05
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	7.77E-03	1.67E-04	7.94E-03	2.29E-04	4.91E-06	2.34E-04
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	2.75E-03	4.58E-05	2.79E-03	8.09E-05	1.35E-06	8.23E-05
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	3.71E-05	7.69E-07	3.79E-05	1.09E-06	2.26E-08	1.12E-06
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	6.40E+00	1.74E-01	6.57E+00	1.88E-01	5.13E-03	1.94E-01
m ³	Consumo risorse Idriche	4.53E-01	5.89E-03	4.59E-01	1.33E-02	1.73E-04	1.35E-02

Eterogiunzione (HJT)							
Unità di misura	Categoria d'impatto	FU Wp			FU kWh		
		Fase A	Fase C	Tot.	Fase A	Fase C	Tot.
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	8.32E-01	6.62E-03	8.38E-01	2.36E-02	1.88E-04	2.38E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	3.87E-03	5.52E-06	3.87E-03	1.10E-04	1.57E-07	1.10E-04
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	8.28E-01	6.62E-03	8.34E-01	2.35E-02	1.88E-04	2.37E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	6.76E-04	1.79E-06	6.78E-04	1.92E-05	5.09E-08	1.92E-05
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	8.58E-08	8.38E-10	8.67E-08	2.44E-09	2.38E-11	2.46E-09
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	6.75E-03	1.78E-05	6.77E-03	1.92E-04	5.04E-07	1.92E-04
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	4.57E-05	4.21E-08	4.57E-05	1.30E-06	1.19E-09	1.30E-06
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	1.12E-03	5.42E-06	1.12E-03	3.17E-05	1.54E-07	3.19E-05
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	1.18E-02	6.07E-05	1.19E-02	3.36E-04	1.72E-06	3.38E-04
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	4.12E-03	1.83E-05	4.14E-03	1.17E-04	5.21E-07	1.18E-04
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	6.74E-05	6.31E-08	6.75E-05	1.92E-06	1.79E-09	1.92E-06

c.9337.Comune di Parma - Prot. 08/04/2025.0097815.E Si attesta che la presente copia digitale è conforme all'originale digitale ai sensi del l. art. 23-bis del D.Lgs. n. 82/2005. Il corrispondente documento informatico originale è conservato negli archivi di Comune di Parma

MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	1.00E+01	5.80E-02	1.01E+01	2.85E-01	1.65E-03	2.86E-01
m ³	Consumo risorse Idriche	4.43E-01	6.60E-04	4.43E-01	1.26E-02	1.88E-05	1.26E-02

Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon)							
Unità di misura	Categoria d'impatto	FU Wp			FU kWh		
		Fase A	Fase C	Tot.	Fase A	Fase C	Tot.
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento globale - Totale	4.58E-01	2.71E-02	4.85E-01	1.31E-02	7.75E-04	1.39E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	2.58E-03	1.77E-04	2.76E-03	7.40E-05	5.07E-06	7.91E-05
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	4.56E-01	2.71E-02	4.83E-01	1.31E-02	7.75E-04	1.38E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - LULUC	4.01E-04	9.36E-06	4.10E-04	1.15E-05	2.68E-07	1.18E-05
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	1.88E-07	3.89E-10	1.88E-07	5.38E-09	1.11E-11	5.39E-09
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	3.03E-03	1.15E-04	3.15E-03	8.68E-05	3.28E-06	9.01E-05
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	1.23E-04	2.29E-06	1.25E-04	3.53E-06	6.56E-08	3.59E-06
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	6.64E-04	5.24E-05	7.17E-04	1.90E-05	1.50E-06	2.05E-05
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	6.49E-03	4.46E-04	6.94E-03	1.86E-04	1.28E-05	1.99E-04
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	1.98E-03	1.45E-04	2.12E-03	5.67E-05	4.17E-06	6.08E-05
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	2.15E-05	1.07E-07	2.16E-05	6.17E-07	3.07E-09	6.20E-07
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	5.16E+00	3.10E-01	5.47E+00	1.48E-01	8.88E-03	1.57E-01
m ³	Consumo risorse Idriche	2.65E-01	1.19E-02	2.77E-01	7.58E-03	3.40E-04	7.92E-03

Film sottile di Tellururo di Cadmio (CdTe)							
Unità di misura	Categoria d'impatto	FU Wp			FU kWh		
		Fase A	Fase C	Tot.	Fase A	Fase C	Tot.
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	2.84E-01	6.05E-02	3.45E-01	8.14E-03	1.73E-03	9.87E-03
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	5.99E-04	1.50E-03	2.10E-03	1.71E-05	4.28E-05	6.00E-05
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	2.83E-01	5.89E-02	3.42E-01	8.10E-03	1.69E-03	9.79E-03
kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	3.38E-04	3.94E-05	3.77E-04	9.67E-06	1.13E-06	1.08E-05
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	1.56E-08	6.19E-09	2.18E-08	4.46E-10	1.77E-10	6.23E-10
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	2.17E-03	1.58E-04	2.32E-03	6.20E-05	4.51E-06	6.65E-05
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	1.26E-05	2.77E-06	1.54E-05	3.62E-07	7.93E-08	4.41E-07
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	4.02E-04	3.33E-05	4.35E-04	1.15E-05	9.53E-07	1.25E-05
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	4.70E-03	3.53E-04	5.06E-03	1.35E-04	1.01E-05	1.45E-04

c.9337. Comune di Parma - Prot. 08/04/2025.0097815.E Si attesta che la presente copia digitale è conforme all'originale digitale ai sensi del l'art. 23-bis del D.Lgs. n. 82/2005. Il corrispondente documento informatico originale è conservato negli archivi di Comune di Parma

kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	1.30E-03	1.50E-04	1.45E-03	3.71E-05	4.28E-06	4.14E-05
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	3.42E-05	8.44E-07	3.50E-05	9.78E-07	2.41E-08	1.00E-06
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	3.46E+00	8.52E-01	4.32E+00	9.91E-02	2.44E-02	1.24E-01
m³	Consumo risorse Idriche	6.24E-02	1.10E-02	7.34E-02	1.79E-03	3.15E-04	2.10E-03

Hybrid Passivated Back Contact (HPBC)							
Unità di misura	Categoria d'impatto	FU Wp			FU kWh		
		Fase A	Fase C	Tot.	Fase A	Fase C	Tot.
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento globale - Totale	5.54E-01	1.55E-02	5.70E-01	1.60E-02	4.48E-04	1.65E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	9.42E-03	3.99E-03	1.34E-02	2.72E-04	1.15E-04	3.88E-04
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	6.28E-01	1.03E-02	6.38E-01	1.82E-02	2.99E-04	1.85E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - LULUC	3.64E-04	9.39E-06	3.73E-04	1.05E-05	2.71E-07	1.08E-05
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	8.75E-08	1.26E-10	8.76E-08	2.53E-09	3.66E-12	2.53E-09
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	4.19E-03	1.29E-04	4.32E-03	1.21E-04	3.72E-06	1.25E-04
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	1.99E-04	2.42E-06	2.02E-04	5.77E-06	7.00E-08	5.84E-06
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	8.52E-04	1.19E-04	9.71E-04	2.46E-05	3.44E-06	2.81E-05
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	8.48E-03	5.06E-04	8.98E-03	2.45E-04	1.46E-05	2.60E-04
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	3.14E-03	1.30E-04	3.27E-03	9.08E-05	3.77E-06	9.46E-05
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	3.87E-05	2.20E-08	3.87E-05	1.12E-06	6.35E-10	1.12E-06
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	6.30E+00	1.08E-01	6.41E+00	1.82E-01	3.13E-03	1.85E-01
m³	Consumo risorse Idriche	6.69E-01	-1.59E-02	6.53E-01	1.94E-02	-4.59E-04	1.89E-02

All Back Contacts (ABC)							
Unità di misura	Categoria d'impatto	FU Wp			FU kWh		
		Fase A	Fase C	Tot.	Fase A	Fase C	Tot.
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	5.36E-01	1.54E-02	5.52E-01	1.54E-02	4.40E-04	1.58E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	5.74E-03	2.19E-05	5.76E-03	1.64E-04	6.27E-07	1.65E-04
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	5.34E-01	1.54E-02	5.50E-01	1.53E-02	4.40E-04	1.57E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	3.63E-04	4.59E-06	3.68E-04	1.04E-05	1.32E-07	1.05E-05
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	6.02E-07	1.53E-10	6.02E-07	1.72E-08	4.37E-12	1.72E-08
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	3.52E-03	9.41E-06	3.52E-03	1.01E-04	2.69E-07	1.01E-04
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	1.68E-04	3.61E-07	1.68E-04	4.81E-06	1.03E-08	4.82E-06
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	9.58E-04	3.43E-06	9.61E-04	2.74E-05	9.81E-08	2.75E-05

mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	7.26E-03	3.38E-05	7.29E-03	2.08E-04	9.67E-07	2.09E-04
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	2.02E-03	8.62E-06	2.03E-03	5.78E-05	2.47E-07	5.81E-05
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	2.06E-05	2.45E-08	2.07E-05	5.91E-07	7.03E-10	5.92E-07
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	5.79E+00	2.28E-02	5.81E+00	1.66E-01	6.54E-04	1.66E-01
m³	Consumo risorse Idriche	2.38E-01	1.47E-03	2.39E-01	6.81E-03	4.22E-05	6.85E-03

Per l'indicatore Riscaldamento Globale – Totale i moduli fotovoltaici a eterogiunzione dichiarano un impatto ambientale medio superiore rispetto alle altre strutture, con un valore di 8.38E-01 ± 6.99E-02 kg CO₂ eq/Wp e 2.38E-02 ± 1.99E-03 kg CO₂ eq/kWh. Per l'indicatore Consumo Ozono Stratosferico l'unico modello di modulo fotovoltaico composto da celle solari a struttura ABC dichiara un impatto ambientale superiore rispetto alle altre strutture, con un valore pari a 6.02E-07 kg CFC 11 eq/Wp e 1.72E-08 kg CFC 11 eq/kWh. Per l'indicatore Acidificazione, i moduli fotovoltaici a eterogiunzione dichiarano un impatto ambientale medio superiore rispetto alle altre strutture, con un valore di 6.8E-03 ± 1.6E-03 mol H⁺ eq/Wp e 1.92E-04 ± 4.4E-05 mol H⁺ eq/kWh. Per l'indicatore Eutrofizzazione - Acqua Dolce l'unico modello di modulo fotovoltaico composto da celle solari a struttura HPBC dichiara un impatto ambientale superiore rispetto alle altre strutture, con un valore pari a 2.02E-04 kg P eq/Wp e 5.84E-06 kg P eq/kWh. Anche per l'indicatore Eutrofizzazione - Mare, i moduli fotovoltaici a HPBC dichiarano un impatto ambientale maggiore, con un valore di 9.71E-04 kg N eq/Wp e 2.81E-05 kg N eq/kWh. Per l'indicatore Eutrofizzazione - Terrestre, i moduli fotovoltaici a eterogiunzione dichiarano un impatto ambientale medio superiore rispetto alle altre strutture, con un valore di 1.19E-02 ± 1.75E-03 mol N eq/Wp e 3.38E-04 ± 4.97E-05 mol N eq/kWh. Per l'indicatore Formazione Fotochimica Ozono, i moduli fotovoltaici a eterogiunzione dichiarano un impatto ambientale medio maggiore rispetto alle altre strutture, con un valore di 4.14E-03 ± 5.16E-04 kg NMVOC eq/Wp e 1.18E-04 ± 1.47E-05 kg NMVOC eq/kWh. Per l'indicatore Consumo Risorse - Minerali/metalli, i moduli fotovoltaici a eterogiunzione dichiarano un impatto ambientale medio superiore rispetto alle altre strutture, con un valore di 6.75E-05 ± 1.83E-05 kg Sb eq/Wp e 1.92E-06 ± 5.2E-07 kg Sb eq/kWh. Per l'indicatore Consumo Risorse - Combustibili fossili, i moduli fotovoltaici a eterogiunzione dichiarano un impatto ambientale medio superiore rispetto alle altre strutture, con un valore di 1.01E+01 ± 3.91E-01 MJ/Wp e 2.86E-01 ± 1.11E-02 MJ/kWh. Per l'indicatore Consumo risorse Idriche, il modulo fotovoltaico con struttura HPBC dichiara un impatto ambientale medio pari a 6.53E-01 m³/Wp e 1.89E-02 m³/kWh. In Figura 8, è riportata una mappa del profilo ambientale normalizzato per il valore maggiore di ciascun indicatore ambientale.

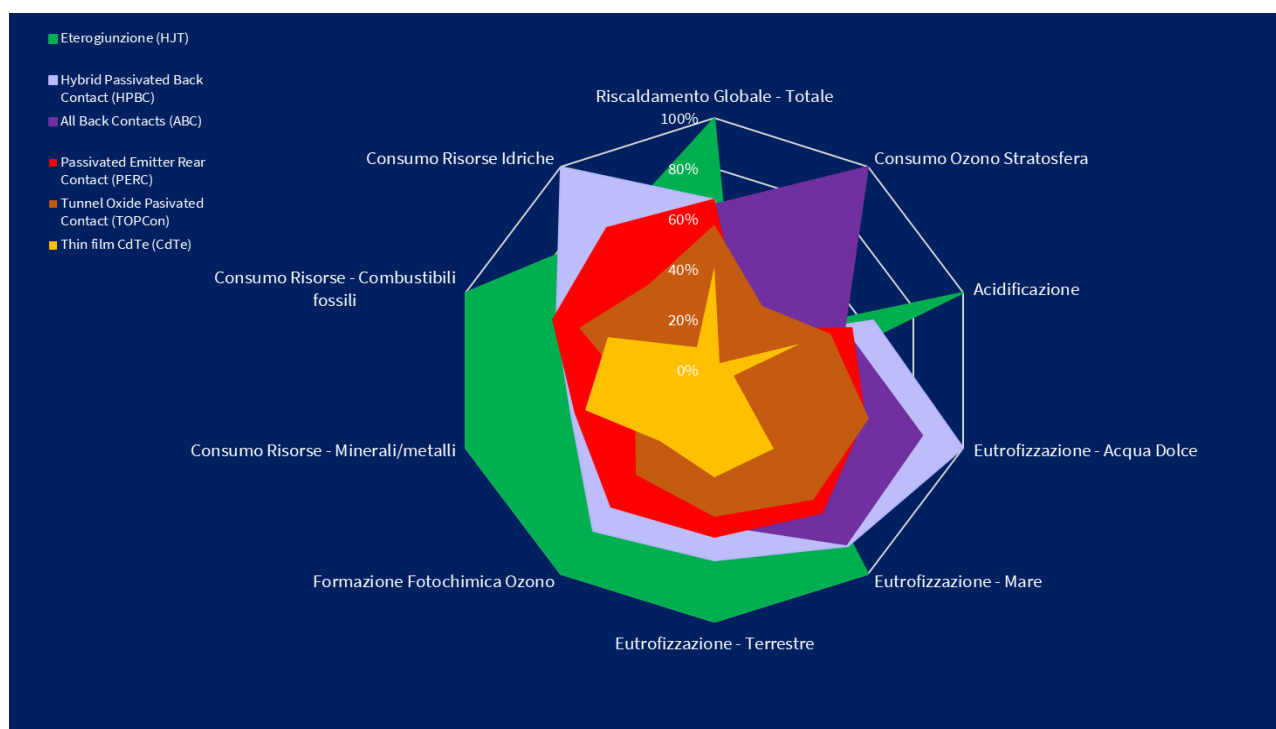


Figura 8 Mappa degli indicatori ambientali normalizzati per ciascuna struttura di cella solare per moduli fotovoltaici monofacciali.

6.5.2 Moduli fotovoltaici bifacciali

Anche per i moduli fotovoltaici bifacciali è stato possibile caratterizzare il profilo ambientale identificando dalle dichiarazioni ambientali di prodotto le seguenti strutture di celle solari e dei relativi moduli fotovoltaici:

1. Passivated Emitter Rear Contact (PERC)
2. Eterogiunzione (HJT)
3. Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon)
4. High Performance and Hybrid Passivated Dual-Junction Cell (HPDC)
5. All Back Contacts (ABC)

In Tabella 37, sono stati riportati gli indici di impatto ambientale medio per unità funzionale di Watt picco e kilowatt ora, distinguendo la struttura delle celle solari che compongono il modulo fotovoltaico. La produzione di energia elettrica è stata modellata secondo i parametri riportati in Tabella 2.

Tabella 37 Indici d'impatto ambientale per unità funzionale watt picco e kilowattora di moduli fotovoltaici bifacciali composti da diverse strutture di cella solare.

Passivated Emitter Rear Contact (PERC)							
Unità di misura	Categoria d'impatto	FU Wp			FU kWh		
		Fase A	Fase C	Tot.	Fase A	Fase C	Tot.
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	6.50E-01	1.41E-02	6.65E-01	1.89E-02	4.09E-04	1.93E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	3.66E-03	9.90E-05	3.76E-03	1.06E-04	2.87E-06	1.09E-04
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	6.46E-01	1.43E-02	6.61E-01	1.88E-02	4.15E-04	1.92E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	7.98E-04	1.10E-05	8.09E-04	2.32E-05	3.19E-07	2.35E-05
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	5.09E-08	1.00E-09	5.19E-08	1.48E-09	2.90E-11	1.51E-09
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	4.04E-03	7.10E-05	4.11E-03	1.17E-04	2.06E-06	1.19E-04
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	7.01E-05	2.17E-06	7.23E-05	2.03E-06	6.31E-08	2.10E-06
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	8.14E-04	1.29E-05	8.26E-04	2.36E-05	3.75E-07	2.40E-05
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	8.45E-03	1.41E-04	8.59E-03	2.45E-04	4.10E-06	2.49E-04
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	2.92E-03	4.06E-05	2.96E-03	8.47E-05	1.18E-06	8.59E-05
kg Sb eq.	Consumo Risorse - Minerali/metalli	3.93E-05	8.26E-07	4.02E-05	1.14E-06	2.40E-08	1.17E-06
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	7.76E+00	1.42E-01	7.90E+00	2.25E-01	4.12E-03	2.29E-01
m ³	Consumo risorse Idriche	4.86E-01	3.49E-03	4.90E-01	1.41E-02	1.01E-04	1.42E-02

Eterogiunzione (HJT)							
Unità di misura	Categoria d'impatto	FU Wp			FU kWh		
		Fase A	Fase C	Tot.	Fase A	Fase C	Tot.
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	4.23E-01	1.45E-02	4.38E-01	1.20E-02	4.13E-04	1.24E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	1.58E-04	2.87E-03	3.03E-03	4.49E-06	8.15E-05	8.60E-05
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	4.23E-01	1.15E-02	4.34E-01	1.20E-02	3.28E-04	1.23E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	3.54E-04	1.86E-05	3.73E-04	1.01E-05	5.28E-07	1.06E-05
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	1.26E-08	2.97E-10	1.29E-08	3.57E-10	8.44E-12	3.66E-10
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	2.54E-03	5.77E-05	2.60E-03	7.23E-05	1.64E-06	7.39E-05
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	9.81E-05	3.36E-06	1.01E-04	2.79E-06	9.55E-08	2.88E-06
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	5.72E-04	1.71E-05	5.89E-04	1.62E-05	4.85E-07	1.67E-05
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	5.72E-03	1.50E-04	5.87E-03	1.62E-04	4.27E-06	1.67E-04
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	1.66E-03	4.49E-05	1.70E-03	4.71E-05	1.28E-06	4.83E-05

c.9337.Comune di Parma - Prot. 08/04/2025.0097815.E Si attesta che la presente copia digitale è conforme all'originale digitale ai sensi del l'art. 23-bis del D.Lgs. n. 82/2005. Il corrispondente documento informatico originale è conservato negli archivi di Comune di Parma

kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	2.14E-05	2.42E-08	2.14E-05	6.09E-07	6.86E-10	6.09E-07
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	5.03E+00	1.50E-01	5.18E+00	1.43E-01	4.27E-03	1.47E-01
m³	Consumo risorse Idriche	3.39E-01	1.75E-03	3.41E-01	9.64E-03	4.98E-05	9.69E-03

Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon)							
Unità di misura	Categoria d'impatto	FU Wp			FU kWh		
		Fase A	Fase C	Tot.	Fase A	Fase C	Tot.
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	5.70E-01	1.98E-02	5.90E-01	1.67E-02	5.80E-04	1.73E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	3.79E-03	1.45E-04	3.93E-03	1.11E-04	4.24E-06	1.15E-04
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	5.66E-01	1.96E-02	5.86E-01	1.66E-02	5.75E-04	1.72E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	4.34E-04	8.72E-05	5.21E-04	1.27E-05	2.56E-06	1.53E-05
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	3.82E-08	2.71E-09	4.09E-08	1.12E-09	7.94E-11	1.20E-09
mol H+ eq.	Acidificazione	3.84E-03	1.11E-04	3.95E-03	1.12E-04	3.25E-06	1.16E-04
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	1.01E-04	4.13E-06	1.05E-04	2.95E-06	1.21E-07	3.07E-06
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	8.00E-04	2.03E-05	8.20E-04	2.34E-05	5.95E-07	2.40E-05
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	8.15E-03	2.01E-04	8.35E-03	2.39E-04	5.90E-06	2.45E-04
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	2.83E-03	5.11E-05	2.89E-03	8.31E-05	1.50E-06	8.46E-05
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	2.56E-05	1.15E-06	2.67E-05	7.49E-07	3.36E-08	7.83E-07
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	6.05E+00	2.04E-01	6.26E+00	1.77E-01	5.98E-03	1.83E-01
m³	Consumo risorse Idriche	2.43E-01	9.01E-03	2.52E-01	7.11E-03	2.64E-04	7.38E-03

High Performance and Hybrid Passivated Dual-Junction Cell (HPDC)							
Unità di misura	Categoria d'impatto	FU Wp			FU kWh		
		Fase A	Fase C	Tot.	Fase A	Fase C	Tot.
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	3.85E-01	8.73E-03	3.94E-01	1.11E-02	2.51E-04	1.13E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	1.40E-03	5.43E-04	1.95E-03	4.04E-05	1.56E-05	5.60E-05
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	3.83E-01	8.19E-03	3.91E-01	1.10E-02	2.35E-04	1.12E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	4.03E-04	1.38E-06	4.04E-04	1.16E-05	3.97E-08	1.16E-05
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	9.21E-09	1.75E-10	9.38E-09	2.65E-10	5.03E-12	2.70E-10
mol H+ eq.	Acidificazione	2.48E-03	3.55E-05	2.52E-03	7.14E-05	1.02E-06	7.25E-05
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	1.09E-04	1.04E-06	1.10E-04	3.13E-06	2.99E-08	3.16E-06
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	5.61E-04	9.88E-06	5.71E-04	1.61E-05	2.84E-07	1.64E-05

mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	5.60E-03	1.09E-04	5.71E-03	1.61E-04	3.13E-06	1.64E-04
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	1.64E-03	3.89E-05	1.68E-03	4.72E-05	1.12E-06	4.83E-05
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	1.66E-05	1.29E-08	1.66E-05	4.78E-07	3.71E-10	4.78E-07
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	4.54E+00	1.20E-01	4.66E+00	1.30E-01	3.44E-03	1.34E-01
m ³	Consumo risorse Idriche	4.28E-01	3.86E-03	4.32E-01	1.23E-02	1.11E-04	1.24E-02

All Back Contacts (ABC)							
Unità di misura	Categoria d'impatto	FU Wp			FU kWh		
		Fase A	Fase C	Tot.	Fase A	Fase C	Tot.
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	5.18E-01	1.16E-02	5.29E-01	1.48E-02	3.33E-04	1.52E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	2.25E-03	2.58E-05	2.27E-03	6.44E-05	7.39E-07	6.52E-05
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	5.16E-01	1.15E-02	5.27E-01	1.48E-02	3.31E-04	1.51E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	3.58E-04	5.42E-06	3.63E-04	1.03E-05	1.55E-07	1.04E-05
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	2.61E-08	1.49E-10	2.63E-08	7.49E-10	4.27E-12	7.54E-10
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	3.62E-03	8.87E-06	3.63E-03	1.04E-04	2.54E-07	1.04E-04
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	1.68E-04	2.73E-06	1.71E-04	4.82E-06	7.84E-08	4.90E-06
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	9.75E-04	2.99E-06	9.78E-04	2.80E-05	8.57E-08	2.81E-05
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	7.48E-03	3.01E-05	7.51E-03	2.14E-04	8.63E-07	2.15E-04
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	2.06E-03	7.76E-06	2.07E-03	5.91E-05	2.23E-07	5.93E-05
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	2.12E-05	2.86E-08	2.12E-05	6.06E-07	8.20E-10	6.07E-07
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	5.75E+00	2.45E-02	5.78E+00	1.65E-01	7.02E-04	1.66E-01
m ³	Consumo risorse Idriche	2.36E-01	1.45E-03	2.37E-01	6.76E-03	4.15E-05	6.80E-03

Per l'indicatore Riscaldamento Globale - Totale i moduli fotovoltaici a PERC dichiarano un impatto ambientale medio superiore rispetto alle altre strutture, con un valore di $6.65E-01 \pm 3.62E-01$ kg CO₂ eq/Wp e $1.93E-02 \pm 1.05E-02$ kg CO₂ eq/kWh. Per l'indicatore Consumo Ozono Stratosferico i moduli fotovoltaici a PERC dichiarano un impatto ambientale medio superiore rispetto alle altre strutture, con un valore di $5.19E-08 \pm 4.68E-08$ kg CFC11 eq/Wp e $1.51E-09 \pm 1.36E-09$ kg CFC11 eq/kWh. Per l'indicatore Acidificazione i moduli fotovoltaici a PERC dichiarano un impatto ambientale medio superiore rispetto alle altre strutture, con un valore di $4.11E-03 \pm 1.86E-03$ mol H⁺ eq/Wp e $1.19E-04 \pm 5.40E-05$ mol H⁺ eq/kWh. Per l'indicatore Eutrofizzazione - Acqua Dolce il modulo fotovoltaico ABC dichiara un impatto ambientale medio superiore rispetto alle altre strutture, con un valore di $1.71E-04$ kg P eq/Wp e $4.90E-06$ kg P eq/kWh.

Per l'indicatore Eutrofizzazione - Mare il modulo fotovoltaico ABC dichiara un impatto ambientale medio superiore rispetto alle altre strutture, con un valore di $9.78E-04$ kg N eq/Wp e $2.81E-05$ kg N eq/kWh. Per l'indicatore Eutrofizzazione - Terrestre i moduli fotovoltaici a PERC dichiarano un impatto ambientale medio superiore rispetto alle altre strutture, con un valore di $8.59E-03 \pm 3.56E-03$ mol N eq/Wp e $2.49E-04 \pm 1.03E-04$ mol N eq/kWh. Per l'indicatore Formazione Fotochimica Ozono i moduli fotovoltaici a PERC dichiarano un impatto ambientale medio superiore rispetto alle altre strutture, con un valore di $2.96E-03 \pm 1.22E-03$ kg NMVOC eq/Wp e $8.59E-05 \pm 3.54E-05$ kg NMVOC eq/kWh. Per l'indicatore Consumo Risorse - Minerali/metalli i moduli fotovoltaici a PERC dichiarano un impatto ambientale medio superiore rispetto alle altre strutture, con un valore di $4.02E-05 \pm 3.40E-05$ kg Sb eq/Wp e $1.17E-06 \pm 9.87E-07$ kg Sb eq/kWh. Per l'indicatore Consumo Risorse - Combustibili fossili i moduli fotovoltaici a PERC dichiarano un impatto ambientale medio superiore rispetto alle altre strutture, con un valore di $7.90E+00 \pm 4.93E+00$ MJ/Wp e $2.08E-01 \pm 1.43E-01$ MJ/kWh. Per l'indicatore Consumo risorse Idriche i moduli fotovoltaici a PERC dichiarano un impatto ambientale medio superiore rispetto alle altre strutture, con un valore di $4.90E-01 \pm 2.81E-01$ m³/Wp e $1.42E-02 \pm 8.16E-03$ m³/kWh. In Figura 9, è riportata una mappa del profilo ambientale normalizzato per il valore maggiore di ciascun indicatore ambientale.

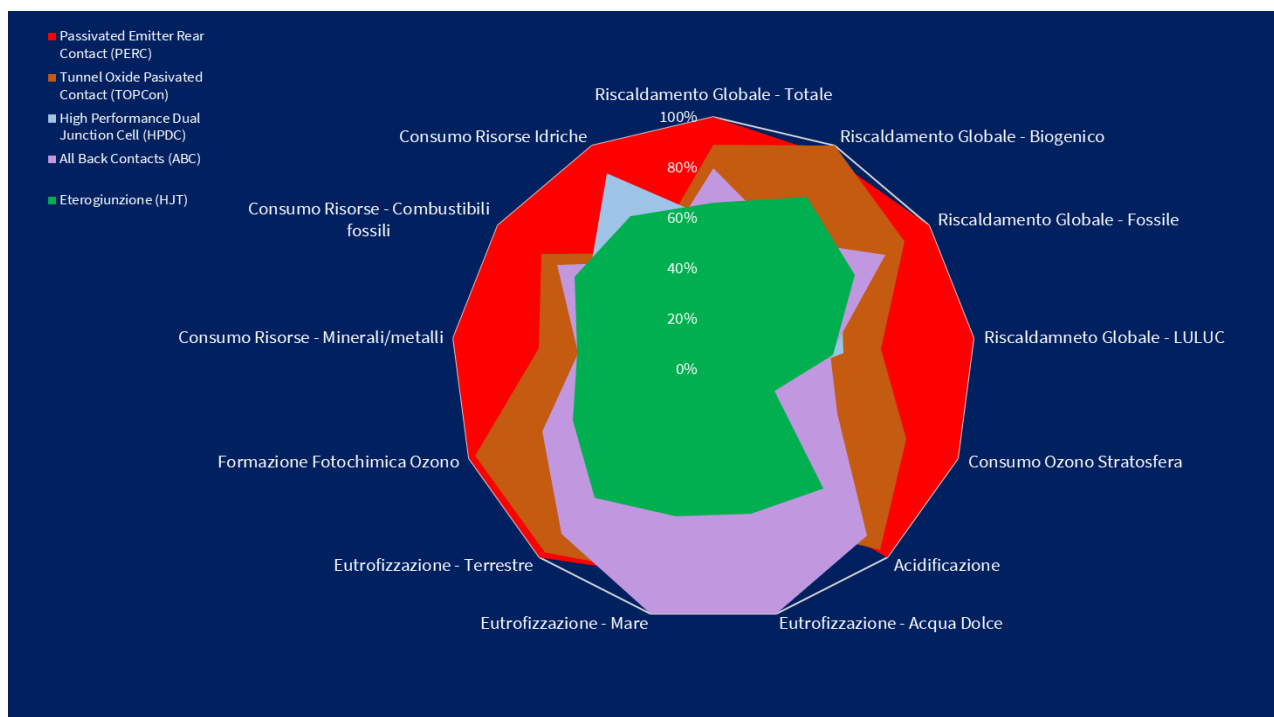


Figura 9 Mappa degli indicatori ambientali normalizzati per ciascuna struttura di cella solare per moduli fotovoltaici bifacciali

6.6 Guadagno Bifacciale

Nella trattazione precedente in sezione 6.2.3.2 è stato riportato il profilo ambientale per moduli fotovoltaici bifacciali per unità di watt picco, considerando pertanto solo la potenza nominale in uscita dal

modulo senza considerare quindi l'energia elettrica prodotta dovuta all'assorbimento della luce solare riflessa attraverso la faccia posteriore. Il profilo ambientale per kWh è stato quindi definito a partire da questo valore e non considerando il ruolo della faccia posteriore, modellando la produzione dell'energia elettrica secondo i parametri in Tabella 2. In questa sezione si investiga quindi la mutazione del profilo ambientale di moduli fotovoltaici bifacciali rispetto a quelli monofacciali. Per questa parte dello studio si è deciso di limitare l'analisi ai moduli fotovoltaici a struttura PERC e TOPCon, in quanto rappresentano il maggior numero delle certificazioni considerate e permettono quindi un confronto accurato e significativo. In particolare sono presenti rispettivamente 9 e 6 dichiarazioni ambientali di prodotto per moduli fotovoltaici monofacciali PERC e TOPCon e 6 e 8 per moduli fotovoltaici bifacciali. Seguendo le indicazioni relative alla modellazione della produzione di energia elettrica presenti nelle dichiarazioni ambientali di prodotto, anche descritte nella Regola di Categoria di Prodotto NPCR029, il guadagno bifacciale è stato modellato secondo l'Equazione 1, considerando il fattore b pari a 0.1, 0.2 e 0.3 corrispondenti rispettivamente ad un aumento della produzione di energia elettrica del 10%, 20% e 30%. La produzione media di energia elettrica in 25 anni di servizio è riportata in Tabella 38. In Tabella 39, sono riportati gli indici d'impatto ambientale per unità di kilowatt ora prodotto secondo le condizioni descritte.

Tabella 38 Produzione di energia elettrica modellata in diverse condizioni per moduli fotovoltaici PERC e TOPCon.

Passivated Emitter Rear Contact Media Energia elettrica prodotta in 25 anni	
Monofacciale (kWh/kWp)	34653
Bifacciale – Guadagno 0% (kWh/kWp)	34455
Bifacciale – Guadagno 10% (kWh/kWp)	37999
Bifacciale – Guadagno 20% (kWh/kWp)	41454
Bifacciale – Guadagno 30% (kWh/kWp)	44908
Tunnel Oxide Passivated Contact Media Energia elettrica prodotta in 25 anni	
Monofacciale (kWh/kWp)	34904
Bifacciale – Guadagno 0% (kWh/kWp)	34118
Bifacciale – Guadagno 10% (kWh/kWp)	37617
Bifacciale – Guadagno 20% (kWh/kWp)	41037
Bifacciale – Guadagno 30% (kWh/kWp)	44457

Tabella 39 Indici d'impatto ambientale per unità funzionale kilowattora di moduli fotovoltaici bifacciali PERC e TOPCon considerando diversi valori di guadagno bifacciale, 0%, 10%, 20% e 30% a confronto di moduli fotovoltaici monofacciali composti da celle solari con la medesima struttura.

Passivated Emitter Rear Contact						
			FU kWh			
Unità di misura	Categoria d'impatto	Monofacciale	0%	10%	20%	30%
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	1.69E-02	1.93E-02	1.75E-02	1.60E-02	1.48E-02

kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	1.58E-04	1.09E-04	9.89E-05	9.07E-05	8.37E-05
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	1.67E-02	1.92E-02	1.74E-02	1.59E-02	1.47E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	1.87E-05	2.35E-05	2.13E-05	1.95E-05	1.80E-05
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	3.48E-09	1.51E-09	1.37E-09	1.25E-09	1.16E-09
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	1.10E-04	1.19E-04	1.08E-04	9.92E-05	9.15E-05
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	3.60E-06	2.10E-06	1.90E-06	1.74E-06	1.61E-06
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	2.32E-05	2.40E-05	2.17E-05	1.99E-05	1.84E-05
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	2.34E-04	2.49E-04	2.26E-04	2.07E-04	1.91E-04
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	8.23E-05	8.59E-05	7.79E-05	7.14E-05	6.59E-05
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	1.12E-06	1.17E-06	1.06E-06	9.69E-07	8.94E-07
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	1.94E-01	2.29E-01	2.08E-01	1.91E-01	1.76E-01
m ³	Consumo risorse Idriche	1.35E-02	1.42E-02	1.29E-02	1.18E-02	1.09E-02

Tunnel Oxide Passivated Contact						
Unità di misura	Categoria d'impatto	FU kWh				
		Monofacciale	0%	10%	20%	30%
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	1.39E-02	1.73E-02	1.57E-02	1.44E-02	1.33E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	7.91E-05	1.15E-04	1.04E-04	9.58E-05	8.84E-05
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	1.38E-02	1.72E-02	1.56E-02	1.43E-02	1.32E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	1.18E-05	1.53E-05	1.39E-05	1.27E-05	1.17E-05
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	5.39E-09	1.20E-09	1.09E-09	9.97E-10	9.20E-10
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	9.01E-05	1.16E-04	1.05E-04	9.62E-05	8.88E-05
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	3.59E-06	3.07E-06	2.79E-06	2.56E-06	2.36E-06
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	2.05E-05	2.40E-05	2.18E-05	2.00E-05	1.84E-05
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	1.99E-04	2.45E-04	2.22E-04	2.04E-04	1.88E-04
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	6.08E-05	8.46E-05	7.67E-05	7.03E-05	6.49E-05
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	6.20E-07	7.83E-07	7.10E-07	6.51E-07	6.01E-07
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	1.57E-01	1.83E-01	1.66E-01	1.52E-01	1.41E-01
m ³	Consumo risorse Idriche	7.92E-03	7.38E-03	6.69E-03	6.13E-03	5.66E-03

Considerando l'indicatore Riscaldamento Globale – Totale come rappresentativo della relazione tra indice d'impatto ambientale e guadagno bifacciale e quindi produzione energetica, si riporta in Figura 10 il confronto tra moduli monofacciali e bifacciali appartenenti alla struttura PERC.

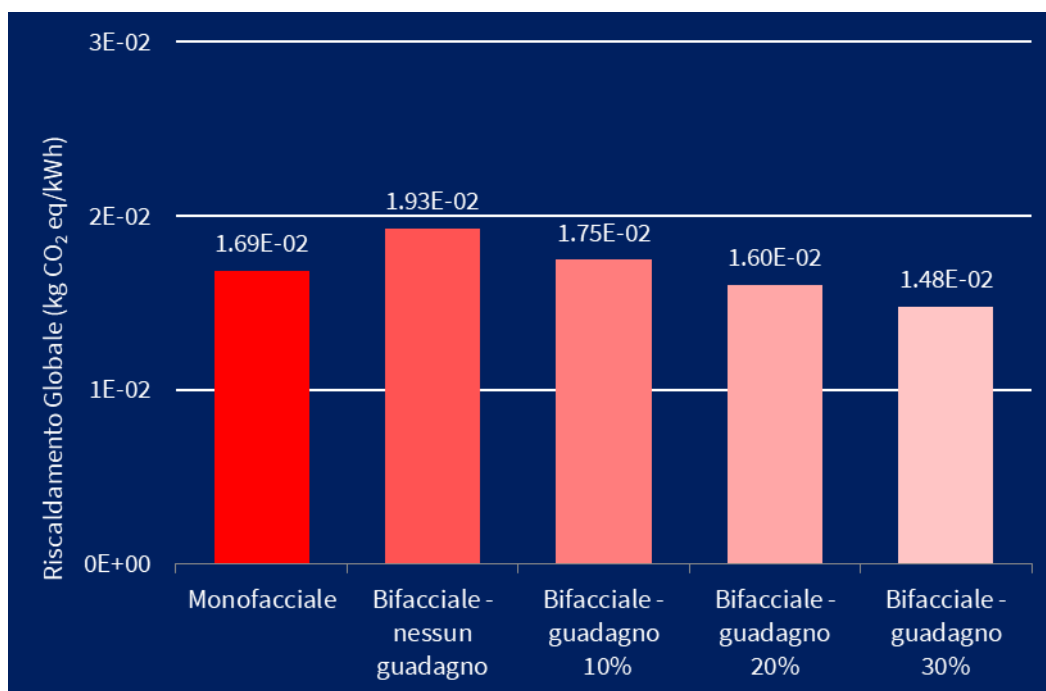


Figura 10 Confronto dell'indice d'impatto ambientale per l'indicatore Riscaldamento Globale - Totale tra moduli fotovoltaici monofacciali e bifacciali PERC, stimando un guadagno bifacciale del 10%, 20% e 30%.

L'indice d'impatto ambientale per un modulo bifacciale PERC è superiore ad un modulo con la stessa struttura di cella solare ma di tipologia monofacciale. Un guadagno bifacciale del 10% comporta una riduzione ad un valore pari a 1.75E-02 kg CO₂ eq/kWh. Un aumento della produzione di energia elettrica legato alla cattura della luce solare dalla faccia posteriore del 20% e 30% porta ad un'ulteriore riduzione dell'indice d'impatto ambientale rispettivamente a 1.6E-02 e 1.48E-02 kg CO₂ eq/kWh. Similmente per moduli fotovoltaici composti da celle solari di struttura TOPCon si riporta il confronto in Figura 11.

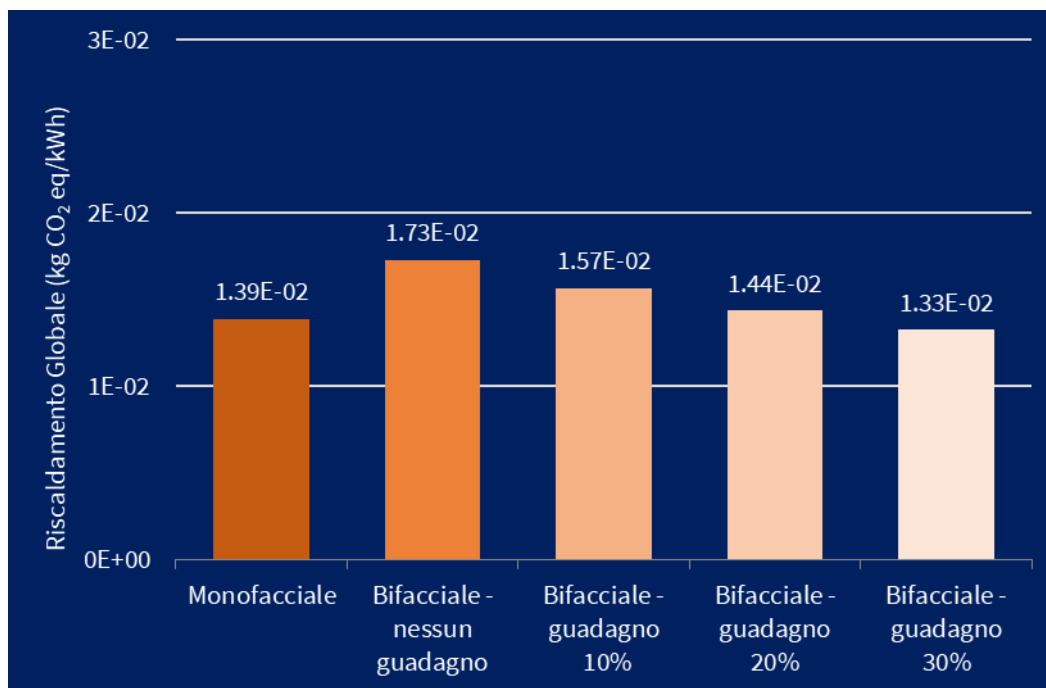


Figura 11 Confronto dell'indice d'impatto ambientale per l'indicatore Riscaldamento Globale - Totale tra moduli fotovoltaici monofacciali e bifacciali TOPCon, stimando un guadagno bifacciale del 10%, 20% e 30%.

L'indice d'impatto ambientale per un modulo bifacciale TOPCon è superiore ad un modulo con la stessa struttura di cella solare ma di tipologia monofacciale. Un guadagno bifacciale del 10% comporta una riduzione ad un valore pari a 1.57E-02 kg CO₂ eq/kWh. Un aumento della produzione di energia elettrica del 20% e 30% porta ad un'ulteriore riduzione dell'indice d'impatto ambientale rispettivamente a 1.44E-02 e 1.33E-02 kg CO₂ eq/kWh.

6.7 Neutralità Carbonica

Il tempo di raggiungimento della neutralità carbonica è definito come il tempo in anni necessario a pareggiare le emissioni di gas climalteranti rilasciati nell'ecosistema durante l'intero ciclo di vita riducendo le emissioni rispetto alla produzione di energia elettrica da altre fonti. In particolare, in questo studio sono state considerate le emissioni relative alla fase del ciclo di vita A e C per come descritte nella Sezione 4.2. Il tempo di raggiungimento della neutralità carbonica è stato quindi valutato secondo l'Equazione 2.

$$2) \text{ Carbon neutrality time} = \frac{GWP_{pv,kWh}}{(GWP_{energy mix, low voltage, IT} - GWP_{pv,kWh} / RSL)}$$

$GWP_{pv,kWh}$ è l'impatto ambientale per l'indicatore Riscaldamento Globale - Totale dovuto alla produzione di 1 kWh nelle condizioni descritte in Tabella 2, $GWP_{energy mix, low voltage, IT}$ è l'impatto ambientale per la produzione di 1 kWh usando il mix energetico italiano e RSL è il tempo di servizio del modulo fotovoltaico, considerato di 25 in questo studio. L'impatto relativo alla produzione

di energia elettrica usando il mix energetico italiano è stato valutato da database *EcoInvent 3.9* scegliendo come provider *market value electricity, low voltage IT*. Per ogni struttura considerata nello studio è stato riportato, Figura 12, il tempo di pareggiamento del modulo monofacciale e bifacciale con un guadagno pari al 10% e 20%.

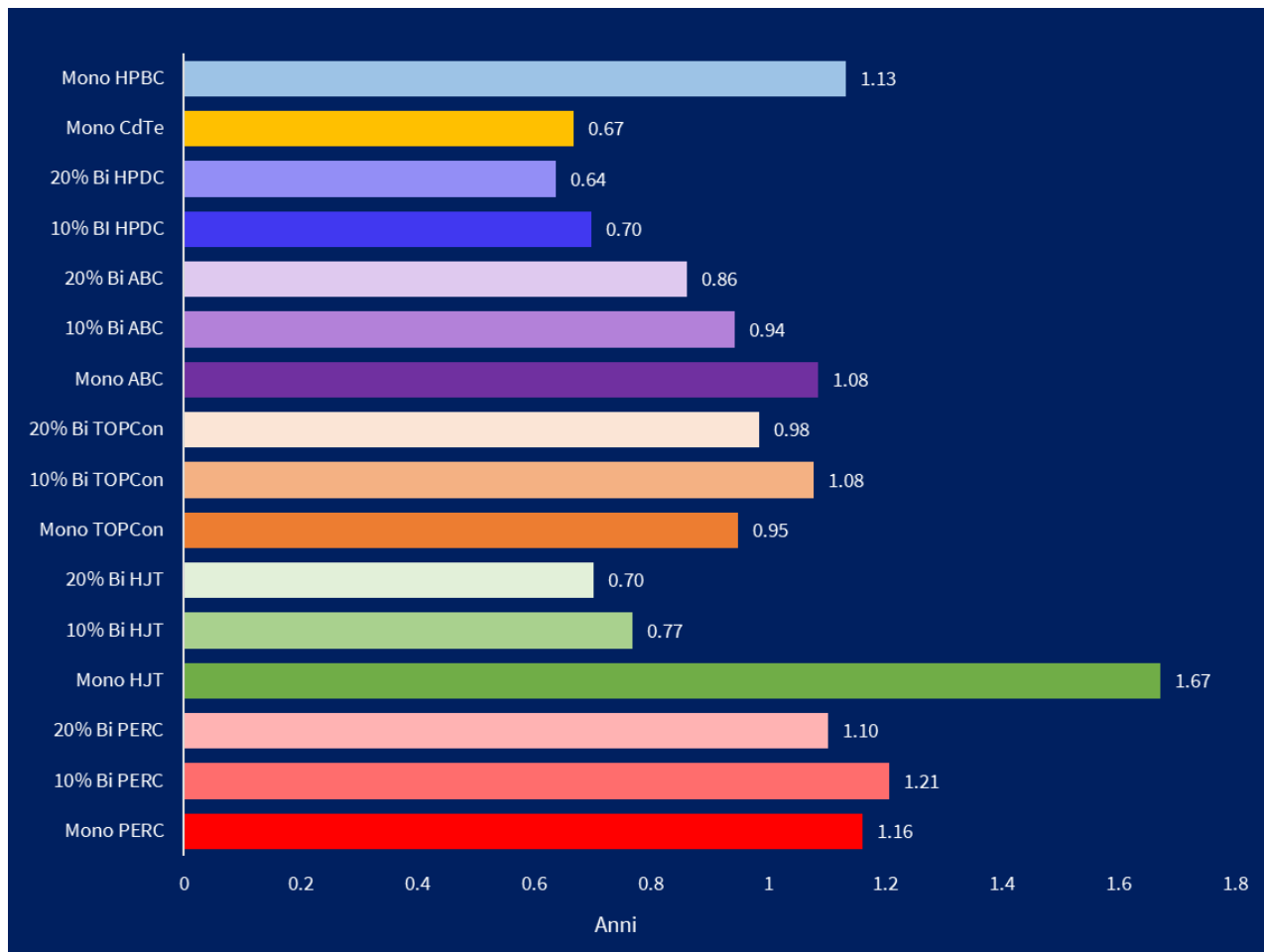


Figura 12 Tempo di raggiungimento della neutralità carbonica per moduli fotovoltaici valutato dal profilo ambientale medio descritto da dichiarazioni ambientali di prodotto.

Per la struttura tipo PERC, moduli monofacciali risultano avere un tempo di pareggiamento pari a 1.16 anni. Moduli bifacciali composti da celle solari con la medesima struttura PERC hanno un tempo di pareggiamento superiore, pari a 1.21 anni, nel caso di un guadagno bifacciale del 10%, mentre si riduce ad un valore inferiore rispetto al caso monofacciale per un guadagno bifacciale del 20%. Moduli monofacciali ad eterogiunzione hanno un tempo di pareggiamento superiore del 40% rispetto al tempo di raggiungimento della neutralità carbonica maggiore stimato per tutte le altre strutture e tipologie di moduli fotovoltaici. Il tempo di pareggiamento per questo tipo di moduli si attesta, secondo le dichiarazioni considerata, a 1.67 anni. Moduli bifacciali ad eterogiunzione mostrano, invece, un tempo di raggiungimento dimezzato rispetto al caso monofacciale, con valore pari a 0.77 anni e 0.7 anni rispettivamente per un guadagno del 10% e 20%. Per la struttura TOPCon il tempo di raggiungimento della

neutralità carbonica è valutato inferiore ad un anno, 0.95 anni, per il caso di modulo fotovoltaico monofacciale. Un modulo bifacciale TOPCon, considerando un guadagno alla produzione di energia elettrica del 10%, ha un tempo di pareggiamento di 1.08 anni, il quale si riduce a 0.98 anni nel caso di guadagno del 20%. Strutture a contatti posteriori ABC mostrano una riduzione del tempo di raggiungimento della neutralità carbonica dal caso monofacciale, 1.08 anni, a quello bifacciale per un guadagno del 10%. Il tempo di pareggiamento per la struttura ABC è 0.94 anni e 0.86 anni rispettivamente per il caso di guadagno del 10% e 20%. Per la struttura HPDC bifacciale il tempo di pareggiamento diminuisce in accordo con l'aumento di produzione di energia elettrica dovuto al maggior guadagno bifacciale, passando da un valore pari a 0.7 anni a 0.64. Per i moduli monofacciali HPBC e a film sottile di tellururo di cadmio il tempo di raggiungimento della neutralità carbonica è pari, rispettivamente, a 1.13 anni e 0.67. Pertanto, moduli monofacciali a eterogiunzione mostrano il tempo di pareggiamento maggiore, mentre moduli bifacciali HPDC con un guadagno del 20% hanno il tempo di pareggiamento minore.

6.8 Fine Vita

La fase di fine vita è soggetta a diverse assunzioni comuni tra le strutture considerate. I consumi relativi al disassemblaggio del modulo installato sono basati sulla modellazione della fase di assemblaggio F5 e la separazione del frame di alluminio dal modulo fotovoltaico è stata considerata eseguita manualmente. I moduli fotovoltaici devono inoltre essere trattati secondo la direttiva europea WEEE Waste from Electrical and Electronic Equipment, la quale impone obiettivi specifici per la loro raccolta, recupero e riciclo. Il recupero medio di materiali è stimato approssimativamente a più dell'80% in peso, mentre il rateo di riciclo è leggermente inferiore. Dopo lo smistamento e un trattamento iniziale, i materiali recuperati sono soggetti ad ulteriori processi di riciclo. I moduli fotovoltaici contenenti materiali pericolosi, come il cadmio nel caso di moduli fotovoltaici a film sottile di tellururo di cadmio, sono invece soggetti a trattamenti specifici. Il riciclo meccanico consente attualmente una gestione ottimale per costi, capacità e consumi dei moduli fotovoltaici dismessi, ma non permette il riciclo del silicio, materiali polimerici e altri materiali che compongono la cella solare. Inoltre, il vetro impiegato nei moduli fotovoltaici adibisce a funzioni specifiche e rispetta caratteristiche particolari, ma questa funzionalità viene persa in seguito al trattamento di riciclo limitandone l'uso a prodotti con requisiti meno stringenti. In questo studio sono stati confrontati gli indici d'impatto ambientale descritti dalle dichiarazioni ambientali di prodotto per le due

macrocategorie di moduli fotovoltaici analizzati: moduli a base di silicio e moduli a film sottile di tellururo di cadmio. Il profilo ambientale per la fase di fine vita è descritto in Figura 13.

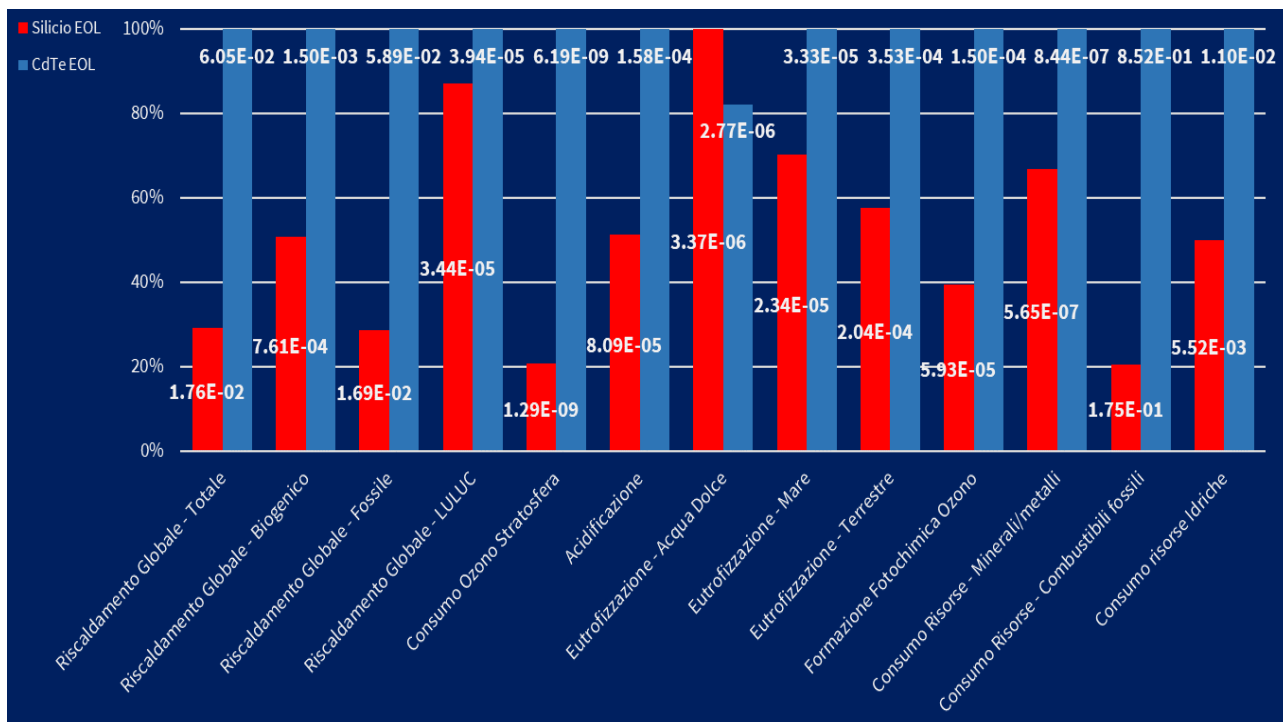


Figura 13 Confronto del profilo ambientale medio relativo alla fase C di fine vita per moduli fotovoltaici a base di silicio e a film sottile di tellururo di cadmio.

Il trattamento a fine vita dei moduli fotovoltaici a base di silicio ha un impatto ambientale inferiore rispetto al trattamento di moduli a base di tellururo di cadmio in 12 categorie d'impatto su 13, legato principalmente ad un minor consumo di energia elettrica. Il consumo di energia elettrica è infatti il driver principale all'impatto ambientale di questi processi. In particolare, per l'indicatore Riscaldamento Globale - Totale, la fase di fine vita di moduli fotovoltaici a base di silicio è inferiore del 70% rispetto al caso film sottile di tellururo di cadmio. Per le altre categorie d'impatto valutate la riduzione è compresa tra il 13% e l'80%. I moduli fotovoltaici a base di silicio mostrano un impatto ambientale maggiore solo per l'indicatore Eutrofizzazione - Acqua Dolce.

6.9 Parametri di installazione

La produzione di energia elettrica di moduli fotovoltaici è influenzata da diversi parametri di installazione i quali determinano quanta luce solare incide sul modulo e quanto efficacemente è convertita in energia elettrica. I fattori principali da considerare sono l'orientamento verso la posizione del sole, l'inclinazione del modulo, ombreggiamento, temperatura ed altri fattori legati all'immissione nella rete elettrica pubblica. In questo studio sono stati investigati i ruoli di orientamento ed inclinazione subordinata alla produzione di energia elettrica e alla determinazione del profilo ambientale. La produzione di energia

elettrica è stata stimata per ogni modulo fotovoltaico, considerando un guadagno del 10% per i moduli bifacciali, secondo l'Equazione 1).

6.9.1 Inclinazione

L'irraggiamento annuale, considerato costante per i 25 anni di servizio stimati, è stato valutato a partire dall'irraggiamento medio mensile per un orientamento fisso rivolto verso sud, ottenuto dal database della radiazione solare PVGIS-SARAH2 alle coordinate 44.837°, 10.338°. L'irraggiamento annuale è stato calcolato per le inclinazioni di 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50° e 60° e riportato in Tabella 40.

Tabella 40 Irraggiamento annuale valutato per diverse inclinazioni di modulo fotovoltaico.

Inclinazione (°)	Irraggiamento annuale (kWh/m ²)
0	1479
10	1598
20	1684
30	1732
40	1739
50	1707
60	1634

Per ogni modulo fotovoltaico considerato sono stati quindi definiti i parametri necessari alla descrizione della produzione di energia elettrica ed è stato definito un valore totale medio di produzione di energia elettrica in 25 anni di servizio. A partire dal profilo ambientale medio, espresso per unità funzionale di watt picco, definito dalle dichiarazioni ambientali di prodotto è stato quindi calcolato il profilo ambientale per unità di kilowattora al variare dell'inclinazione. In Figura 14 è stata riportata la variazione dell'indice d'impatto ambientale per alcuni degli indicatori ambientali considerati rispetto all'inclinazione del modulo fotovoltaico. L'inclinazione pari a 0° mostra l'indice d'impatto ambientale maggiore. I valori degli indici d'impatto diminuiscono all'aumentare dell'inclinazione, raggiungendo il valore minimo per un'inclinazione di 40°. Aumentando ulteriormente l'inclinazione del modulo fotovoltaico, l'energia elettrica prodotta diminuisce e corrisponde quindi ad un aumento dell'indice d'impatto ambientale. Un aumento dell'inclinazione da 0° a 10° corrisponde ad una riduzione dell'impatto ambientale pari al 7.5%. Un'inclinazione di 20° corrisponde invece ad una riduzione del 12.2% rispetto al caso iniziale di 0° ed un ulteriore aumento a 30° corrisponde una diminuzione dell'impatto pari al 14.6%. Tra il caso corrispondente a 30° e 40° la riduzione dell'impatto ambientale è minima e corrisponde ad una riduzione dal 14.6% al 15%. Infine, un ulteriore aumento dell'inclinazione a 50° e 60° comporta rispettivamente del 13.3% e del 9.5% rispetto al caso di inclinazione a 0°.

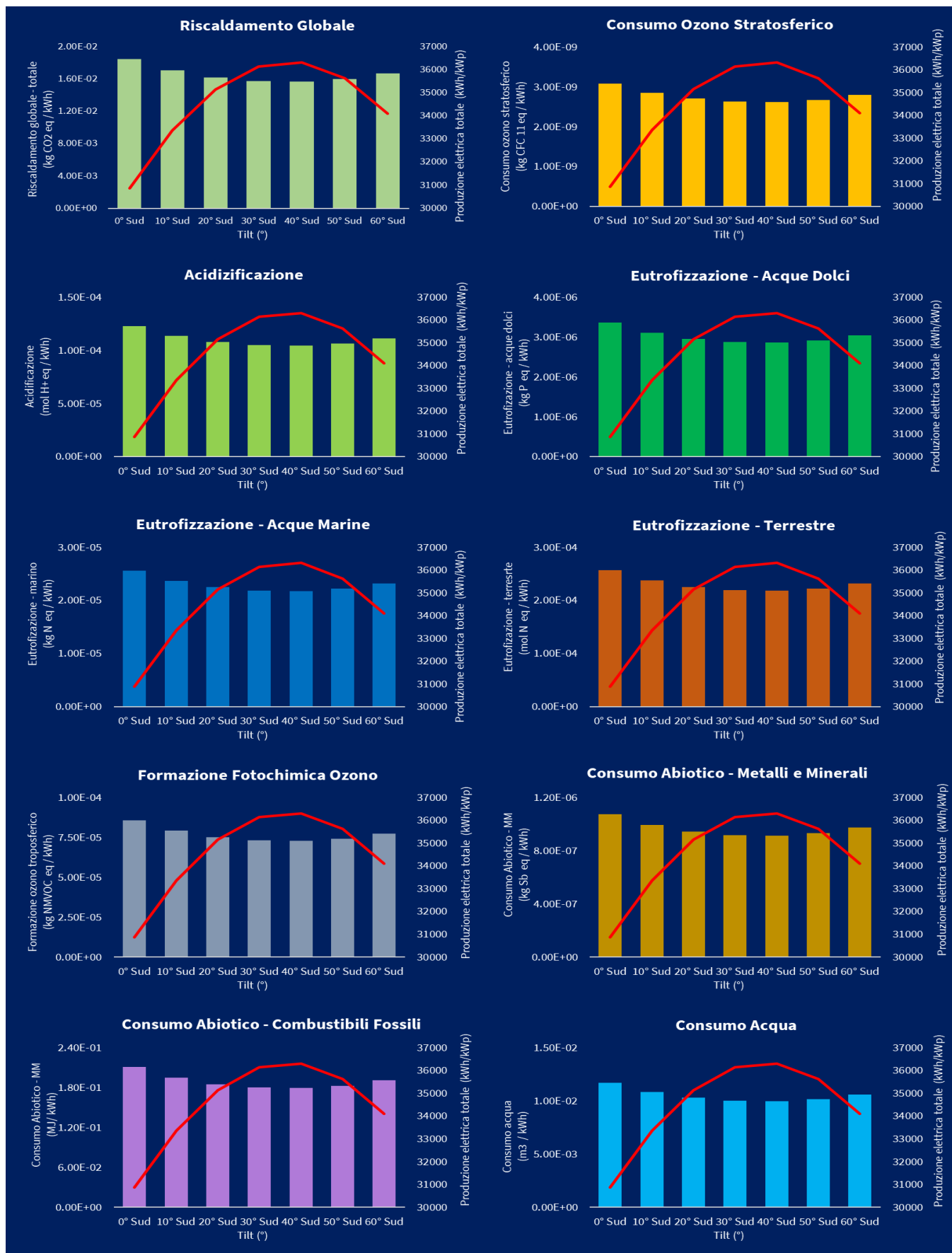


Figura 14 Variazione dell'indice d'impatto ambientale medio e produzione di energia elettrica totale rispetto all'inclinazione per ciascun indicatore ambientale.

6.9.2 Orientamento

L’irraggiamento annuale è stato calcolato, come descritto nella sezione precedente, anche per tre casi limite di orientamento e mantenendo fissa l’inclinazione a 30°. L’irraggiamento, in Tabella 41, è stato valutato per un orientamento verso est, sud e ovest corrispondenti rispettivamente ad un angolo azimutale di -90°, 0° e 90°.

Tabella 41 Irraggiamento annuale valutato per diversi orientamenti del modulo fotovoltaico.

Orientamento	Angolo azimutale (°)	Irraggiamento annuale (kWh/m²)
Est	-90	29008
Sud	0	36141
Ovest	90	29417

A partire dal profilo ambientale medio, espresso per unità funzionale di watt picco, definito dalle dichiarazioni ambientali di prodotto è stato quindi calcolato il profilo ambientale per unità di kilowattora al variare dell’orientamento. Il caso Est mostra una produzione elettrica inferiore rispetto agli altri due casi considerati e pertanto un impatto ambientale per kWh maggiore. Un orientamento verso ovest presenta un leggero aumento della produzione di energia elettrica, il quale corrisponde ad una riduzione di circa l’1.4% rispetto al caso di orientamento verso est. I casi limite est e ovest sono pertanto soggetti ad un irraggiamento solare annuale estremamente simile che comporta una produzione di energia elettrica totale e ad un impatto ambientale difforme di circa l’1%. Al contrario, per un’installazione con angolo azimutale di 0°, corrispondente ad un orientamento verso sud, l’irraggiamento annuale è massimo come anche la produzione di energia elettrica totale. L’impatto ambientale in questo caso è inferiore del 19.7% rispetto ad un orientamento non ottimale verso est. In Figura 15 è stata riportata la variazione dell’indice d’impatto ambientale per alcuni indicatori ambientali rispetto all’orientamento del modulo fotovoltaico.

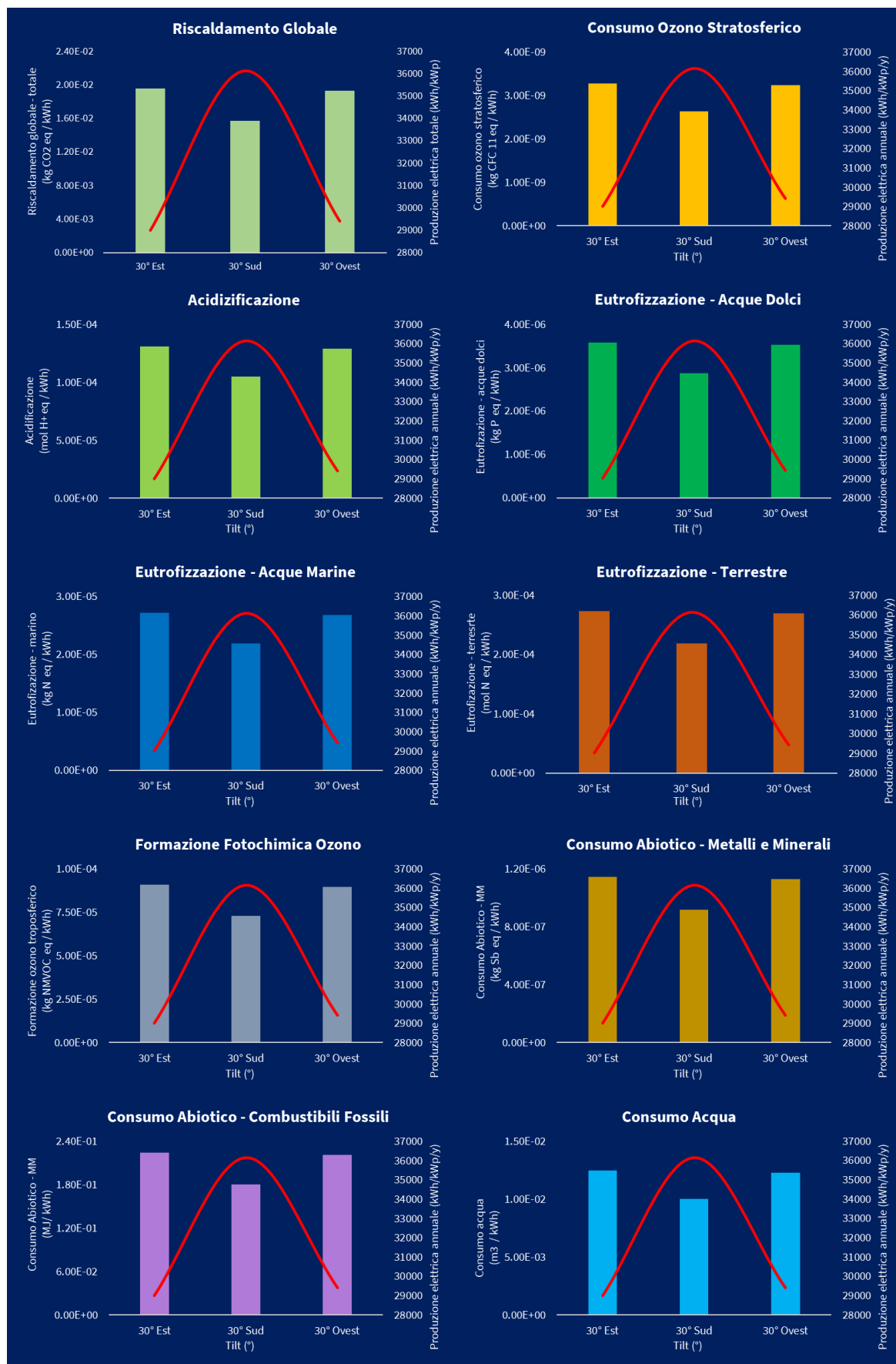


Figura 15 Variazione dell'indice d'impatto ambientale medio e produzione di energia elettrica totale rispetto all'inclinazione per ciascun indicatore ambientale.

6.10 Servizi di produzione di energia elettrica

Infine è stato determinato il profilo ambientale relativo alla produzione di tre tipologie di servizi di produzione energetica modellizzati da dati di letteratura. L’impatto ambientale è stato valutato per l’unità di Watt picco e unità di kilowattora prodotta.

6.10.1 Pensilina Fotovoltaica

La pensilina fotovoltaica è stata modellizzata composta da due unità. La prima unità è composta da 18 moduli fotovoltaici monofacciali, con le caratteristiche tecniche descritte in Tabella 3, installati a 15° fissi di inclinazione e per un totale di 9.036 kWp. La seconda è composta dagli elementi della struttura di sostegno e dagli elementi che determinano perdite di energia nel sistema come cavi elettrici e inverter. Il contributo delle due unità alla definizione del profilo ambientale della pensilina fotovoltaica è evidenziato in Figura 16.

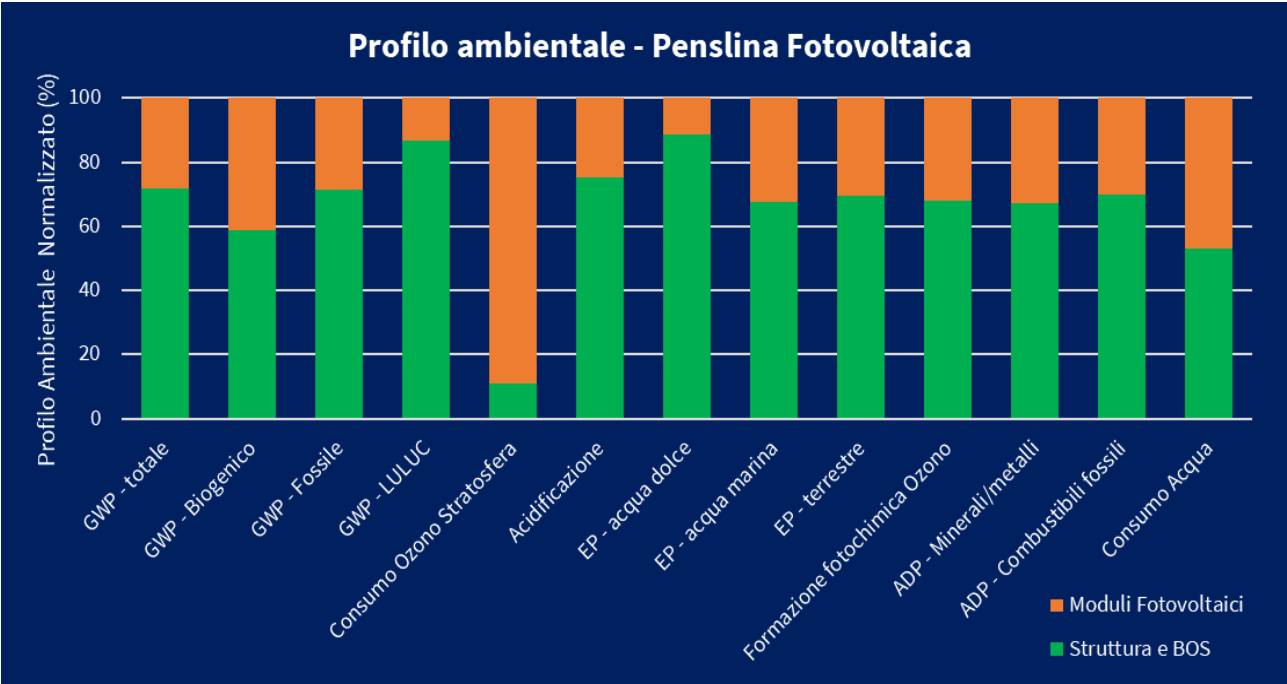


Figura 16 Profilo ambientale di una pensilina fotovoltaica

Il contributo delle singole unità al profilo ambientale è descritto in Tabella 42.

Tabella 42 Indici d’impatto ambientale per unità di Watt picco della pensilina fotovoltaica e contributo percentuale all’impatto totale di moduli fotovoltaici e struttura di sostegno e componenti del balance of system.

Pensilina Fotovoltaica (Unità funzionale Wp)					
Unità di misura	Categoria d’impatto	Moduli Fotovoltaici	Contributo %	Struttura + BOS	Contributo %
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	5.63E-01	28.3	1.42E+00	71.7
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	4.54E-03	41.2	6.48E-03	58.8
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	5.63E-01	28.5	1.41E+00	71.5

kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	5.32E-04	13.3	3.48E-03	86.7
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	1.45E-07	89.1	1.77E-08	10.9
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	3.88E-03	24.6	1.19E-02	75.4
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	1.09E-04	11.5	8.36E-04	88.5
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	7.98E-04	32.3	1.67E-03	67.7
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	7.96E-03	30.6	1.80E-02	69.4
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	2.66E-03	31.9	5.69E-03	68.1
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	3.65E-05	32.9	7.45E-05	67.1
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	6.50E+00	30.1	1.51E+01	69.9
m ³	Consumo risorse Idriche	3.71E-01	46.8	4.21E-01	53.2

La struttura di sostegno e i componenti necessari al trasporto dell’energia elettrica e alla conversione della corrente contribuiscono maggiormente all’impatto ambientale in 12 categorie d’impatto su 13. I moduli fotovoltaici mostrano un impatto ambientale maggiore unicamente nella categoria d’impatto Consumo Ozono Stratosfera. Il contributo della struttura e degli elementi di balance of system nelle restanti categorie d’impatto varia da 53.2% per l’indicatore Consumo Risorse Idriche a 88.5% per Eutrofizzazione – Acqua Dolce. Si evidenzia anche il contributo dei moduli fotovoltaici pari al 41.2% e 46.8% rispettivamente per la categoria Riscaldamento Globale – Biogenico e Consumo Risorse Idriche. Per l’indicatore Consumo Risorse – Minerali e Metalli l’impatto potenziale dei moduli fotovoltaici è stato valutato pari al 32.9% dell’impatto della pensilina fotovoltaica. La valutazione del profilo ambientale rispetto alla produzione di energia elettrica mostra una diminuzione degli indici d’impatto ambientale per un orientamento favorevole rivolto verso sud. Un orientamento della pensilina fotovoltaica verso sud determina quindi una riduzione dell’impatto ambientale pari al 12% rispetto al caso di orientamento verso est, come descritto in Tabella 43.

Tabella 43 Variazione degli indici d'impatto ambientale rispetto all'orientamento per il caso studio pensilina fotovoltaica azimutale.

Pensilina Fotovoltaica (Unità funzionale kWh)							
Unità di misura	Categoria d’impatto	Est		Sud		Ovest	
		Moduli Fotovoltaici	Struttura + BOS	Moduli Fotovoltaici	Struttura + BOS	Moduli Fotovoltaici	Struttura + BOS
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	1.95E-02	4.93E-02	1.71E-02	4.34E-02	1.93E-02	4.89E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	1.57E-04	2.25E-04	1.38E-04	1.98E-04	1.56E-04	2.22E-04

kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	1.95E-02	4.90E-02	1.71E-02	4.31E-02	1.93E-02	4.85E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	1.84E-05	1.20E-04	1.62E-05	1.06E-04	1.83E-05	1.19E-04
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	5.01E-09	6.14E-10	4.41E-09	5.40E-10	4.97E-09	6.08E-10
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	1.34E-04	4.11E-04	1.18E-04	3.61E-04	1.33E-04	4.07E-04
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	3.76E-06	2.89E-05	3.31E-06	2.55E-05	3.73E-06	2.87E-05
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	2.76E-05	5.78E-05	2.43E-05	5.08E-05	2.74E-05	5.72E-05
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	2.76E-04	6.24E-04	2.42E-04	5.49E-04	2.73E-04	6.18E-04
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	9.21E-05	1.97E-04	8.10E-05	1.73E-04	9.12E-05	1.95E-04
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	1.26E-06	2.58E-06	1.11E-06	2.27E-06	1.25E-06	2.55E-06
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	2.25E-01	5.22E-01	1.98E-01	4.60E-01	2.23E-01	5.17E-01
m ³	Consumo risorse Idriche	1.28E-02	1.46E-02	1.13E-02	1.28E-02	1.27E-02	1.44E-02

Infine è stato valutato anche il tempo di raggiungimento della Neutralità Carbonica e la relazione che lo lega all’orientamento, in Tabella 44. Per i casi di orientamento della pensilina verso est e ovest, il tempo di raggiungimento della Neutralità Carbonica è stato stimato rispettivamente pari a 5.53 e 5.47 anni. Un orientamento verso sud permette invece una riduzione del tempo di pareggiamento delle emissioni di gas climalteranti pari al 14% rispetto al caso verso est.

Tabella 44 Tempo di raggiungimento della neutralità carbonica per una pensilina fotovoltaica in relazione all’orientamento di installazione e per un’inclinazione fissa di 15°.

Orientamento	Tempo di pareggiamento [anni]
Ovest	5.47
Est	5.53
Sud	4.74

6.10.2 Ancorato a tetto spiovente

Il sistema di produzione di energia elettrica ancorato a tetto spiovente è stato modellizzato composto da due unità. La prima unità è composta da 18 moduli fotovoltaici monofacciali, con le caratteristiche tecniche descritte in Tabella 3, installati a 20° fissi di inclinazione e per un totale di 9.036 kWp. La seconda è composta dagli elementi della struttura di sostegno e dagli elementi che determinano perdite di energia nel sistema come cavi elettrici e inverter. Il contributo delle due unità alla definizione del profilo ambientale della pensilina fotovoltaica è evidenziato in Figura 17.

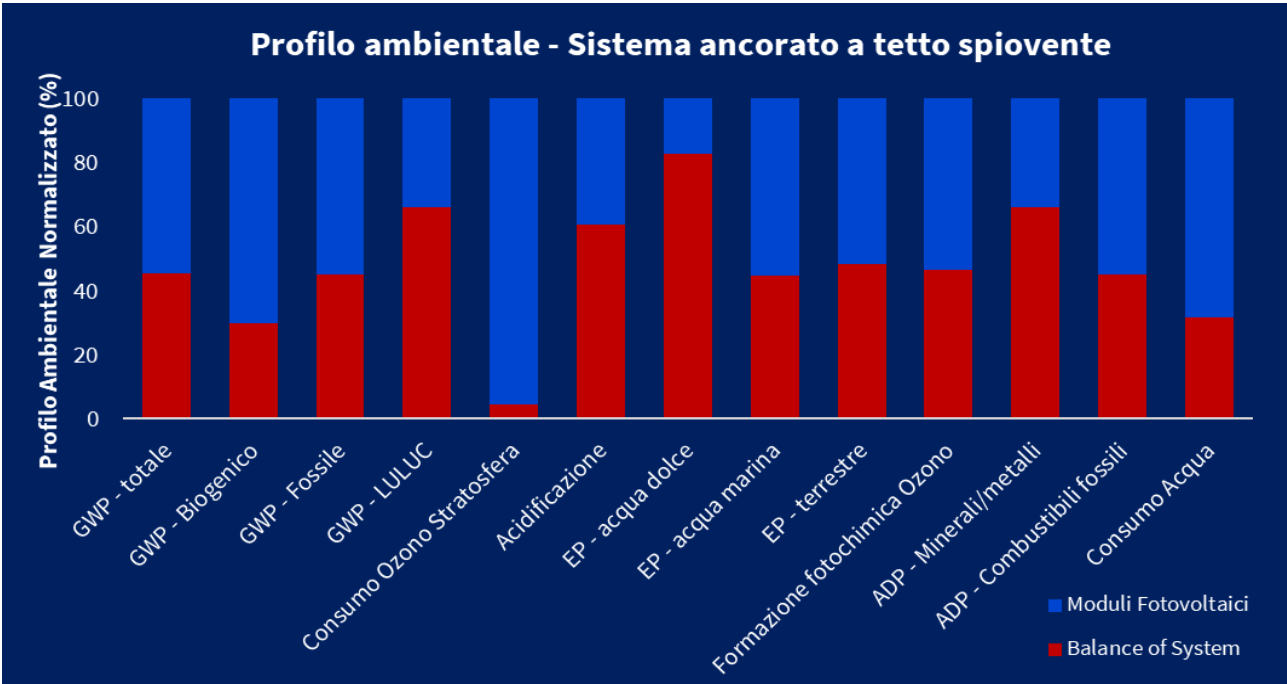


Figura 17 Profilo ambientale di un sistema di produzione di energia elettrica da fotovoltaico ancorato a un tetto spiovente con un'inclinazione pari a 20°.

Il contributo delle singole unità al profilo ambientale è descritto in Tabella 45.

Tabella 45 Indici d'impatto ambientale per unità di Watt picco del sistema ancorato ad un tetto spiovente e contributo percentuale all'impatto totale di moduli fotovoltaici e struttura di sostegno e componenti del balance of system.

Sistema ancorato a tetto spiovente (Unità funzionale Wp)					
Unità di misura	Categoria d'impatto	Moduli Fotovoltaici	Contributo %	Struttura + BOS	Contributo %
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	5.63E-01	54.7	4.66E-01	45.3
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	4.54E-03	70.0	1.95E-03	30.0
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	5.63E-01	54.9	4.63E-01	45.1
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - LULUC	5.32E-04	34.0	1.04E-03	66.0
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	1.45E-07	95.4	7.04E-09	4.6
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	3.88E-03	39.2	6.02E-03	60.8
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	1.09E-04	17.1	5.26E-04	82.9
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	7.98E-04	55.3	6.44E-04	44.7
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	7.96E-03	51.7	7.42E-03	48.3
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	2.66E-03	53.3	2.33E-03	46.7
kg Sb eq.	Consumo Risorse - Minerali/metalli	3.65E-05	34.0	7.08E-05	66.0
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	6.50E+00	55.0	5.33E+00	45.0
m ³	Consumo risorse Idriche	3.71E-01	68.5	1.71E-01	31.5

In questo caso la struttura più snella di supporto e ancoraggio dei moduli fotovoltaici, accompagnata dagli elementi di balance of system, contribuisce in modo minore all'impatto ambientale rispetto al caso precedente della pensilina fotovoltaica. Il contributo dei moduli fotovoltaici è infatti prevalente in 9 categorie su 13, ad esclusione di Riscaldamento Globale - LULUC, Acidificazione, Eutrofizzazione - Acqua Dolce e Consumo Risorse - Minerali e Metalli. Il valore degli indici d'impatto ambientale per la struttura e i componenti elettrici è inferiore rispetto al caso della pensilina fotovoltaica e in particolare si evidenzia una riduzione di circa il 68% per la categoria di Riscaldamento Globale e del 60% per quelle di Consumo Ozono Stratosfera, Eutrofizzazione - Mare, Eutrofizzazione - Terrestre, Formazione Fotochimica Ozono, Consumo Risorse - Combustibili Fossili e Consumo Risorse Idriche. La variazione minore è per l'indicatore di Consumo Risorse - Minerali e Metalli, in quanto il contributo principale è legato ai componenti elettrici quali cavi e inverter di corrente, che rimangono invariati tra i due casi. La valutazione del profilo ambientale rispetto alla produzione di energia elettrica mostra una diminuzione degli indici d'impatto ambientale per un orientamento favorevole rivolto verso sud. Un orientamento del sistema verso sud

determina quindi una riduzione dell'impatto ambientale pari al 14% rispetto al caso di orientamento verso est, come descritto in Tabella 46.

Tabella 46 Variazione degli indici d'impatto ambientale rispetto all'orientamento azimutale per il caso studio sistema ancorato a tetto spiovente.

Sistema ancorato a tetto spiovente (Unità funzionale kWh)							
Unità di misura	Categoria d'impatto	Est		Sud		Ovest	
		Moduli Fotovoltaici	Struttura + BOS	Moduli Fotovoltaici	Struttura + BOS	Moduli Fotovoltaici	Struttura + BOS
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	1.95E-02	1.61E-02	1.68E-02	1.39E-02	1.60E-02	1.93E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	1.57E-04	6.74E-05	1.35E-04	5.79E-05	6.67E-05	1.56E-04
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	1.95E-02	1.60E-02	1.67E-02	1.38E-02	1.59E-02	1.93E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - LULUC	1.84E-05	3.58E-05	1.58E-05	3.08E-05	3.55E-05	1.82E-05
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	5.01E-09	2.44E-10	4.31E-09	2.10E-10	2.41E-10	4.96E-09
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	1.34E-04	2.08E-04	1.15E-04	1.79E-04	2.06E-04	1.33E-04
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	3.76E-06	1.82E-05	3.23E-06	1.57E-05	1.80E-05	3.72E-06
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	2.76E-05	2.23E-05	2.38E-05	1.92E-05	2.21E-05	2.73E-05
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	2.76E-04	2.57E-04	2.37E-04	2.21E-04	2.54E-04	2.73E-04
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	9.21E-05	8.05E-05	7.91E-05	6.92E-05	7.97E-05	9.11E-05
kg Sb eq.	Consumo Risorse - Minerali/metalli	1.26E-06	2.45E-06	1.09E-06	2.11E-06	2.42E-06	1.25E-06
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	2.25E-01	1.84E-01	1.94E-01	1.59E-01	1.83E-01	2.23E-01
m ³	Consumo risorse Idriche	1.28E-02	5.91E-03	1.10E-02	5.08E-03	5.85E-03	1.27E-02

Infine è stato valutato anche il tempo di raggiungimento della Neutralità Carbonica e la relazione che lo lega all'orientamento, in Tabella 47. Per i casi di orientamento della pensilina verso est e ovest, il tempo di raggiungimento della Neutralità Carbonica è stato stimato rispettivamente pari a 2.59 e 2.56 anni. Un orientamento verso sud permette invece una riduzione del tempo di pareggiamento delle emissioni di gas climalteranti pari al 15% rispetto al caso verso est.

Tabella 47 Tempo di raggiungimento della neutralità carbonica per un sistema ancorato ad un tetto spiovente in relazione all'orientamento di installazione e per un'inclinazione fissa di 20°.

Orientamento	Tempo di pareggiamento [anni]
Ovest	2.56
Est	2.59
Sud	2.19

6.10.3 Ancorato a tetto piano

Il sistema di produzione di energia elettrica ancorato a tetto piano è stato modellizzato composto da due unità. La prima unità è composta da 18 moduli fotovoltaici monofacciali, con le caratteristiche tecniche descritte in Tabella 3, installati a 30° fissi di inclinazione e per un totale di 9.036 kWp. La seconda è composta dagli elementi della struttura di sostegno e dagli elementi che determinano perdite di energia nel sistema come cavi elettrici e inverter. Il contributo delle due unità alla definizione del profilo ambientale della pensilina fotovoltaica è evidenziato in Figura 18. Il contributo delle singole unità al profilo ambientale è descritto in Tabella 48.

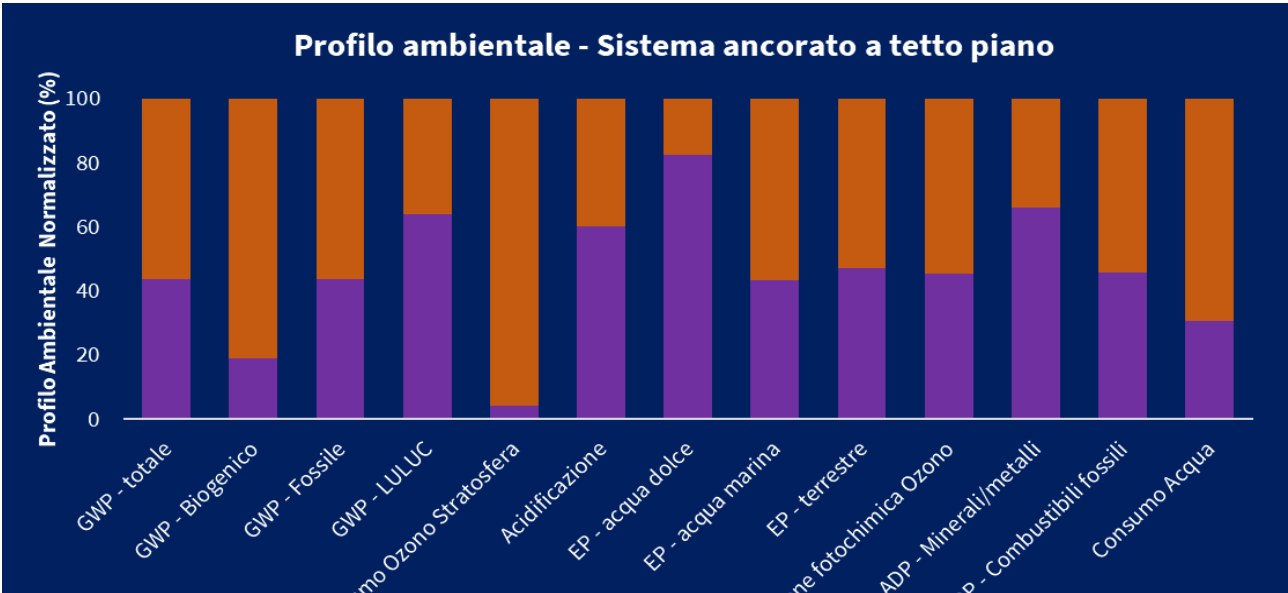


Figura 18 Profilo ambientale di un sistema di produzione di energia elettrica da fotovoltaico ancorato a un tetto piano con un'inclinazione pari a 30°.

Tabella 48 Indici d'impatto ambientale per unità di Watt picco del sistema ancorato ad un tetto piano e contributo percentuale all'impatto totale di moduli fotovoltaici e struttura di sostegno e componenti del balance of system.

Sistema ancorato a tetto piano (Unità funzionale Wp)					
Unità di misura	Categoria d'impatto	Moduli Fotovoltaici	Contributo %	Struttura + BOS	Contributo %
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	5.63E-01	56.4	4.36E-01	43.6
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	4.54E-03	81.2	1.05E-03	18.8
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	5.63E-01	56.5	4.34E-01	43.5
kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	5.32E-04	36.1	9.41E-04	63.9
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	1.45E-07	95.7	6.45E-09	4.3
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	3.88E-03	39.9	5.83E-03	60.1
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	1.09E-04	17.6	5.10E-04	82.4
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	7.98E-04	56.8	6.08E-04	43.2

mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	7.96E-03	53.0	7.07E-03	47.0
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	2.66E-03	54.6	2.21E-03	45.4
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	3.65E-05	34.1	7.07E-05	65.9
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	6.50E+00	54.4	5.45E+00	45.6
m³	Consumo risorse Idriche	3.71E-01	69.6	1.62E-01	30.4

Il sistema ancorato a tetto piano mostra un profilo ambientale simile al sistema ancorato a tetto spiovente. L'indicatore rispetto cui si discosta maggiormente rispetto al caso ancorato a tetto spiovente è il Riscaldamento Globale – Biogenico, per cui è stimato un potenziale impatto ambientale pari al 18.8% invece del 30% del totale. La principale differenza risiede nella riduzione della quantità di acciaio utilizzato, il quale insieme alle barre di alluminio compongono i due driver principali per questo indicatore. Rispetto al caso della pensilina fotovoltaica evidenzia una riduzione di circa il 68% per le categorie di Riscaldamento Globale - Totale, Combustibili Fossili e LULC e del 60% per quelle di Consumo Ozono Stratosfera, Eutrofizzazione – Mare, Eutrofizzazione – Terrestre, Formazione Fotochimica Ozono, Consumo Risorse – Combustibili Fossili e Consumo Risorse Idriche. La valutazione del profilo ambientale rispetto alla produzione di energia elettrica mostra una diminuzione degli indici d'impatto ambientale per un orientamento favorevole rivolto verso sud. Un orientamento del sistema verso sud determina quindi una riduzione dell'impatto ambientale pari al 20% rispetto al caso di orientamento verso est, come descritto in Tabella 49.

Tabella 49 Variazione degli indici d'impatto ambientale rispetto all'orientamento azimutale per il caso studio sistema ancorato a tetto piano.

Sistema ancorato a tetto piano (Unità funzionale kWh)							
Unità di misura	Categoria d'impatto	Est		Sud		Ovest	
		Moduli Fotovoltaici	Struttura + BOS	Moduli Fotovoltaici	Struttura + BOS	Moduli Fotovoltaici	Struttura + BOS
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	2.03E-02	1.57E-02	1.63E-02	1.26E-02	2.00E-02	1.55E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	1.64E-04	3.79E-05	1.31E-04	3.04E-05	1.61E-04	3.74E-05
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	2.03E-02	1.56E-02	1.63E-02	1.25E-02	2.00E-02	1.54E-02
kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	1.92E-05	3.39E-05	1.54E-05	2.72E-05	1.89E-05	3.35E-05
kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	5.22E-09	2.33E-10	4.19E-09	1.87E-10	5.15E-09	2.29E-10
mol H+ eq.	Acidificazione	1.40E-04	2.10E-04	1.12E-04	1.69E-04	1.38E-04	2.07E-04
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	3.92E-06	1.84E-05	3.15E-06	1.47E-05	3.86E-06	1.81E-05



kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	2.88E-05	2.19E-05	2.31E-05	1.76E-05	2.84E-05	2.16E-05
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	2.87E-04	2.55E-04	2.30E-04	2.04E-04	2.83E-04	2.51E-04
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	9.59E-05	7.98E-05	7.70E-05	6.41E-05	9.46E-05	7.87E-05
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	1.32E-06	2.55E-06	1.06E-06	2.04E-06	1.30E-06	2.51E-06
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	2.35E-01	1.97E-01	1.88E-01	1.58E-01	2.31E-01	1.94E-01
m ³	Consumo risorse Idriche	1.34E-02	5.84E-03	1.07E-02	4.69E-03	1.32E-02	5.76E-03

Infine è stato valutato anche il tempo di raggiungimento della Neutralità Carbonica e la relazione che lo lega all'orientamento, in Tabella 50. Per i casi di orientamento della pensilina verso est e ovest, il tempo di raggiungimento della Neutralità Carbonica è stato stimato rispettivamente pari a 2.62 e 2.58 anni. Un orientamento verso sud permette invece una riduzione del tempo di pareggiamento delle emissioni di gas climalteranti pari al 21% rispetto al caso verso est. Inclinazioni vicine a quella ottimale di 40° mostrano una maggiore sensibilità all'orientamento e pertanto un aumento dell'inclinazione è legato anche ad una riduzione maggiore del tempo di raggiungimento della Neutralità Carbonica al variare dell'angolo azimutale.

Tabella 50 Tempo di raggiungimento della neutralità carbonica per un sistema ancorato ad un tetto piano in relazione all'orientamento di installazione e per un'inclinazione fissa di 30°.

Orientamento	Tempo di pareggiamento [anni]
Ovest	2.58
Est	2.62
Sud	2.06

7. Discussione

Il processo di transizione energetica intrapreso dal Comune di Parma per integrare fonti di energia rinnovabile all'approvvigionamento energetico comunale e aumentarne il contributo per soddisfare il consumo energetico necessita di una pianificazione strategica a lungo termine che non consideri unicamente i benefici nel breve periodo ma che individui anche le criticità future. Per queste ragioni l'Analisi del Ciclo di Vita, che come prerogativa ha la quantificazione del potenziale impatto ambientale rispetto a diversi fenomeni globali, risponde a tali necessità delineando un profilo ambientale articolato.

7.1 Moduli fotovoltaici

7.1.1 Profilo ambientale medio di moduli fotovoltaici

Il profilo ambientale medio descritto da 41 dichiarazioni ambientali di prodotto mostra che la fase di vita che contribuisce principalmente all'impatto ambientale totale dei moduli fotovoltaici è quella relativa all'estrazione di materie prime, alla loro lavorazione e all'assemblaggio, attestandosi mediamente ad un valore superiore al 95% per tutti gli indicatori considerati. Un'analisi discreta per driver ambientali per ciascun indicatore non è stata possibile a causa della mancanza di accesso ai dati d'inventario relativa agli studi analizzati. Da dati di letteratura relativi a moduli fotovoltaici a base di silicio cristallino, il driver principale all'impatto ambientale per l'indicatore Riscaldamento Globale rappresentativo della categoria d'impatto Cambiamento Climatico è il consumo di energia, in particolare legato ai processi di purificazione per ottenere silicio di grado solare, ovvero silicio puro fino al 99.9999999%. La fase di fine vita, invece, composta dal disassemblaggio, smistamento e smaltimento dei rifiuti contribuisce limitatamente all'impatto ambientale, mediamente sotto al 5% per le diverse categorie d'impatto. Il profilo ambientale medio così descritto è, però, largamente rappresentativo dell'impatto ambientale dei moduli fotovoltaici a base di silicio cristallino, in quanto costituiscono il 95% degli studi LCA valutati. Delle 41 dichiarazioni ambientali di prodotto, infatti, 39 fanno riferimento a modelli di moduli fotovoltaici composti da celle solari a base di silicio monocristallino, e solamente due riferite a moduli fotovoltaici a film sottile di tellururo di cadmio. La distribuzione delle dichiarazioni ambientali di prodotto rispecchia quindi il mercato globale di moduli fotovoltaici, dominato attualmente da moduli di tipo PERC e TOPCon.

7.1.2 Moduli fotovoltaici a film sottile

Limitandosi alla valutazione del profilo ambientale dei due studi relativi ai moduli fotovoltaici a film sottile di tellururo di cadmio, si evidenzia un impatto ambientale assoluto generalmente inferiore al caso descritto precedentemente, con l'unica eccezione per l'indicatore di Consumo Risorse – Minerali e Metalli. La riduzione dell'impatto ambientale è principalmente imputabile alla drastica diminuzione del volume dello strato di assorbimento responsabile dell'assorbimento della radiazione elettromagnetica e della conversione in corrente elettrica. Una riduzione della quantità di materiale semiconduttore comporta infatti un importante ridimensionamento del consumo di energia durante le fasi di purificazione e deposizione. Un ulteriore fattore distintivo della produzione di moduli fotovoltaici a film sottile di tellururo di cadmio è il ridotto consumo di acqua, evidenziato da una riduzione dell'indicatore Consumo d'acqua dell'80% rispetto ai moduli a base di silicio. Nonostante le promettenti premesse riguardo l'impatto ambientale delle fasi di vita precedenti allo smaltimento, l'attuale produzione di moduli a film sottile di tellururo di cadmio è limitata a circa il 2.5% della produzione globale di moduli fotovoltaici nel 2023, la

quale corrisponde a poco più di 12 GWp a fronte dei 485 GWp di moduli a base di silicio monocristallino prodotti annualmente. La scalabilità industriale della produzione di moduli di tellururo di cadmio ad ordini di grandezza comparabili a quelli del silicio è, infatti, limitata dall'utilizzo di materiali rari come il tellurio, la cui abbondanza è simile a quella del platino nella crosta terrestre e pertanto è il primo responsabile del costo superiore per Wp. Inoltre, la tossicità del cadmio è un fattore di rischio sia durante la produzione ma soprattutto durante i processi di smaltimento, che se non gestiti correttamente, possono rappresentare un rischio ambientale. Mentre i moduli a base di silicio sono recuperati per mezzo di processi meccanici, i moduli CdTe richiedono anche trattamenti chimici specifici per separare e recuperare i metalli pericolosi, limitandone attualmente le possibilità di recupero e riciclo. Per questo motivo, a filiera europea per il riciclo dei moduli fotovoltaici a film sottile di tellururo di cadmio sta avanzando grazie a progetti collaborativi e allo sviluppo di tecnologie innovative, con l'obiettivo di rendere il processo sempre più efficiente e sostenibile.

7.1.3 Fine Vita dei moduli fotovoltaici

I moduli fotovoltaici sono considerati come Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche, RAEE, e sono pertanto soggetti alle normative riguardo la responsabilità del produttore a fine vita e volte al recupero di materie prime critiche. Il ridotto contributo all'impatto ambientale totale della fase di fine vita per moduli fotovoltaici a base di silicio rispetto ai moduli a film sottile di tellururo di cadmio, è riconducibile ai diversi processi di smaltimento a cui sono sottoposti. I moduli a base di silicio sono generalmente gestiti in filiere di smaltimento ottimizzate, per costi e consumi, che permettono il recupero principalmente di alluminio e vetro, perdendo però durante il processo di riciclo le caratteristiche ottiche che contraddistinguono il vetro impiegato nei pannelli fotovoltaici. Altri materiali, come l'argento presente nei contatti metallici, attualmente sono recuperati in minima parte o persi. I moduli a film sottile, invece, sono soggetti a trattamenti specifici e la limitata applicazione a livello industriale attualmente ne determina un maggiore impatto ambientale.

7.1.4 Confronto tra moduli monofacciali e bifacciali e guadagno bifacciale

Il confronto tra moduli fotovoltaici monofacciali e bifacciali, per i moduli PERC e TOPCon, mostra un aumento generale dell'impatto ambientale per unità di Watt picco riconducibile all'aumento di materiale necessario per la realizzazione del modulo fotovoltaico. La potenza nominale valutata in condizioni standard per i moduli bifacciali non considera il possibile guadagno legato alla produzione di energia elettrica dalla faccia posteriore e pertanto nel confronto con i moduli monofacciali, rispetto all'unità funzionale di Watt picco, questo fattore li penalizza. Una rappresentazione del profilo ambientale per unità di kilowattora generato permette, al contrario, una migliore possibilità di confronto tra le due categorie,

in quanto può essere valutata anche la caratteristica intrinseca del guadagno bifacciale. Un aumento lineare della produzione di energia elettrica, dovuto ad un crescente guadagno bifacciale, corrisponde ad una riduzione proporzionale dell'impatto ambientale e a valori di indice d'impatto anche inferiori al caso monofacciale. In particolare, dagli studi LCA analizzati per le tipologie di moduli precedentemente citate, un guadagno bifacciale almeno del 20% è indicato per la riduzione o il pareggiamento dell'indice d'impatto ambientale rispetto alla tipologia monofacciale.

7.1.5 Tempo di pareggiamento

La definizione del profilo ambientale, e in particolare dell'Indicatore Riscaldamento Globale – Totale, ha permesso inoltre di valutare il tempo di pareggiamento medio delle emissioni di gas climalteranti dovute alla produzione e dismissione di moduli fotovoltaici. Mediamente, il tempo di pareggiamento si attesta intorno ad un valore poco superiore ad un anno di servizio per moduli fotovoltaici monofacciali, in condizioni di installazione specifiche al Comune di Parma. La caratteristica della bifaccialità permette, però, se sfruttata correttamente progettando l'installazione per massimizzarne gli effetti, di ridurre ulteriormente il tempo di pareggiamento. Questo risultato evidenzia la stretta relazione tra impatto ambientale e produzione di energia elettrica, sottolineando nuovamente l'importanza delle condizioni d'installazione e del trasferimento alla rete elettrica. Tra i diversi parametri legati al luogo e alle modalità di installazione si è deciso di svolgere un'analisi di scenario riguardo la variazione dell'inclinazione e dell'orientamento e il loro ruolo nella definizione del profilo ambientale del singolo modulo fotovoltaico. Entrambi i parametri incidono sulla quantità di energia solare incidente per unità di superficie, determinando quindi in modo significativo la produzione di corrente elettrica e una riduzione dell'impatto ambientale fino al 15%. Da questa analisi combinata di produzione di energia elettrica e impatto ambientale, risulta che per una latitudine e longitudine corrispondente alle coordinate geografiche del Comune di Parma l'inclinazione ottimale è di 40° con un orientamento rivolto verso sud. Similmente, l'orientamento dimostra essere altrettanto importante poiché si osserva una riduzione dell'impatto ambientale fino al 20% per un angolo azimutale pari a 0° corrispondente ad un orientamento rivolto verso sud, oltre che ad un aumento della produzione di energia elettrica del 25% rispetto ad un orientamento verso est.

7.2 Servizi di produzione di energia elettrica da fotovoltaico

Una soluzione di particolare interesse per l'integrazione di moduli fotovoltaici nel contesto urbano comunale sono le pensiline fotovoltaiche, strutture di sostegno con copertura composta da moduli fotovoltaici in grado di ospitare autovetture, accoppiando la produzione di energia elettrica alla presenza di parcheggi. Oltre il profilo ambientale relativo alle pensiline fotovoltaiche, è stato anche approfondito

l'impatto ambientale di strutture installabili a tetti inclinati e piani di edifici per mezzo di ancoraggi. L'analisi dei risultati evidenzia che, nel caso delle pensiline fotovoltaiche, la struttura di sostegno composta da barre di alluminio, elementi strutturali in acciaio e zavorra in cemento rappresenta la principale fonte di impatto ambientale per la maggior parte delle categorie d'impatto. I componenti elettrici risultano invece particolarmente rilevanti per l'indicatore di Consumo di Risorse – Materiali e Metalli, dovuto alla presenza di materiali critici. Questo dato sottolinea l'importanza della scelta degli elementi strutturali e di design per ridurre l'impatto complessivo del sistema, oltre alle modalità d'installazione legate ad orientamento ed inclinazione che possono essere vincolate ad altri fattori. I moduli fotovoltaici mostrano un contributo maggiore solo nella categoria d'impatto ambientale Consumo Ozono Stratosferico, indicando una rilevanza specifica ma limitata da altri fattori. L'importanza degli elementi strutturali viene anche rispecchiata nella stima del tempo di pareggiamento delle emissioni di gas climalteranti, che si dilata nel peggiore dei casi considerati a più di 5,5 anni. Strutture di sostegno snelle, come negli altri due casi modellizzati, contribuiscono in modo inferiore all'impatto ambientale e determinano un aumento contenuto del tempo di pareggiamento, stimato intorno a 2 anni per impianti ottimizzati per inclinazione e orientamento.

8. Conclusioni

L'Analisi del Ciclo di Vita si è rivelato uno strumento importante per la definizione degli hotspot ambientali caratteristici dell'intero ciclo di vita dei moduli fotovoltaici.

- **Fase produzione:** L'analisi condotta ha evidenziato che la fase di produzione dei moduli fotovoltaici, comprendente l'estrazione delle materie prime, la loro lavorazione e l'assemblaggio, è responsabile di oltre il 95% dell'impatto ambientale totale per tutti gli indicatori considerati. Questo dato è confermato da 41 dichiarazioni ambientali di prodotto, di cui 39 relative a moduli a base di silicio cristallino e solo 2 riferite a moduli a film sottile di tellururo di cadmio. I moduli a base di silicio cristallino dominano il mercato globale, rappresentando il 95% degli studi LCA esaminati.
- **Fase di installazione:** In termini di installazione, i parametri di inclinazione e orientamento dei moduli influiscono significativamente sull'impatto ambientale. Per le coordinate geografiche di Parma, l'inclinazione ottimale è di 40° con orientamento verso sud, permettendo una riduzione dell'impatto fino al 20% e un aumento della produzione di energia elettrica del 25% rispetto ad altre configurazioni.
- **Fine Vita dei pannelli:** La fase di fine vita dei moduli fotovoltaici, che include disassemblaggio, smistamento e smaltimento, contribuisce mediamente per meno del 5% all'impatto ambientale totale. Per i moduli in silicio, le filiere di smaltimento ottimizzate permettono il recupero di materiali come alluminio e vetro, sebbene le caratteristiche ottiche del vetro vadano perse nel processo. Nei moduli a film sottile, i trattamenti specifici richiesti comportano un impatto ambientale maggiore, riflettendo la limitata applicazione industriale di questa tecnologia.
- **Moduli di Tellururo di Cadmio:** I moduli a film sottile di tellururo di cadmio presentano un impatto ambientale sulle varie categorie di impatto generalmente inferiore rispetto ai moduli in silicio cristallino, con un'unica eccezione per l'indicatore relativo al consumo di risorse minerali e metalli. Questa riduzione è attribuibile alla diminuzione del volume dello strato di assorbimento necessario per la conversione energetica, che comporta un minore consumo di energia durante le fasi di purificazione e deposizione. Inoltre, il consumo d'acqua risulta ridotto dell'80% rispetto ai moduli in silicio. Tuttavia, la produzione di questi moduli è limitata a circa il 2,5% della produzione globale nel 2023, a causa della scarsità di tellurio e dei rischi legati alla tossicità del cadmio.
- **Confronto tra monofacciali e Bifacciali:** Un confronto tra moduli monofacciali e bifacciali, nei casi di tecnologie PERC e TOPCon, mostra che i moduli bifacciali presentano un impatto ambientale maggiore per unità di watt-picco a causa dell'aumento di materiali utilizzati. Tuttavia, considerando il potenziale guadagno energetico della faccia posteriore, un'analisi per unità di

kilowattora prodotto evidenzia una riduzione dell'impatto ambientale, con valori inferiori rispetto ai moduli monofacciali quando il guadagno bifacciale è almeno del 20%.

- **Pensiline Fotovoltaiche:** Tra le soluzioni proposte per il contesto urbano, le pensiline fotovoltaiche rappresentano un'opzione interessante. Queste strutture, utilizzabili come coperture per parcheggi, presentano un impatto ambientale significativo legato ai materiali strutturali, in particolare acciaio, alluminio e cemento. Questo dato sottolinea l'importanza di una progettazione ottimizzata per ridurre l'impatto complessivo e massimizzare l'efficienza.
- **Tempo pareggiamento emissioni climalteranti:** Infine, il tempo di pareggiamento delle emissioni di gas climalteranti varia in base alle condizioni di installazione e progettazione. Per i moduli monofacciali installati in condizioni ottimali a Parma, il tempo di pareggiamento è mediamente di poco superiore a un anno, mentre per le pensiline fotovoltaiche con strutture complesse può superare i 5 anni.

9. Indicazioni operative per l'installazione di moduli fotovoltaici

9.1 Indicazioni per installazioni residenziali

Le installazioni fotovoltaiche residenziali si riferiscono a sistemi di dimensioni limitate per la produzione e l'autoconsumo di energia elettrica da fonte solare, installati sulla copertura superiore di edifici privati o pubblici. Occasionalmente, questo tipo di installazione può anche essere predisposto per la cessione di energia in eccesso alla rete elettrica locale. Per le installazioni residenziali sono stati definiti ed analizzati due possibili scenari, ancorati a tetti spioventi ed installati su coperture piane. Poiché gli impianti residenziali sono generalmente caratterizzati da vincoli sulle dimensioni, essi richiedono moduli fotovoltaici efficienti ed affidabili in grado di soddisfare le richieste di consumo energetico e giustificare l'investimento economico iniziale.

9.1.1 Indicazioni per installazioni su copertura spiovente

Queste indicazioni sono state elaborate per fornire informazioni e linee guida riguardo impianti fotovoltaici sopra tetto, installati per mezzo di strutture di supporto, sostegno ed ancoraggio. Il caso di impianti fotovoltaici integrati, a sostituzione di una porzione dell'edificio, non è stato trattato in quanto richiederebbe considerazioni ampie non solo riguardo l'installazione fotovoltaica, ma anche riguardo la struttura che la ospita. Questo tipo di installazioni richiede l'impiego di moduli fotovoltaici monofacciali, in grado di assorbire la luce solare unicamente dalla faccia frontale esposta al sole. Poiché la superficie disponibile per l'installazione è limitata, si definiscono, in base all'analisi delle caratteristiche tecniche e delle performance ambientali dei modelli analizzati (vedi Tabella 36 e Figura 12, Figura 14, Figura 15), le seguenti indicazioni per l'installazione di sistemi fotovoltaici su coperture o tetti spioventi.

- Moduli a base di silicio monocristallino sono da preferirsi per questa tipologia di installazioni, in quanto garantiscono una maggiore produzione di energia elettrica per superficie occupata e un ottimo rapporto qualità-prezzo dettato dalla filiera manifatturiera consolidata rispetto ad altre strutture di celle solari.
- Tra i moduli fotovoltaici a base di silicio monocristallino analizzati, la struttura TOPCon ha l'impatto ambientale minore, in particolare nelle categorie d'impatto ambientale di maggior interesse, Riscaldamento Globale Totale e Consumo di risorse minerali e metalli.
- I moduli con struttura PERC, che attualmente dominano il mercato del fotovoltaico, hanno performance ambientali e specifiche tecniche inferiori, sulla base delle certificazioni analizzate.
- I moduli fotovoltaici ABC e HPBC sono strutture di sviluppo ed ingresso nel mercato recente, pertanto il numero di studi analizzato non viene considerato significativo per definire dei requisiti minimi o consigliati.

- I moduli fotovoltaici con struttura TOPCon hanno il minor tempo di pareggiamento delle emissioni di gas climalteranti tra i moduli a base di silicio monocristallino, con un tempo di pareggiamento inferiore ad un anno per le condizioni di produzione energetica considerate.
- Per massimizzare la produzione di energia elettrica annuale, e al contempo ridurre l'impatto ambientale e il tempo di pareggiamento delle emissioni di gas climalteranti, si consiglia un orientamento rivolto verso sud o ad un angolo azimutale il più possibile vicino ad esso, indipendentemente dalla scelta di tipo di modulo fotovoltaico.
- Dalla simulazione di produzione di energia elettrica in diverse condizioni di installazione per parametri di irradiazione solare localizzati sul Comune di Parma, si è evidenziato come l'inclinazione ideale sarebbe di 40°. I vincoli strutturali ed estetici per coperture di residenze difficilmente permettono installazioni ad un'inclinazione simile e pertanto si consiglia di prediligere, in presenza di alternative alla scelta, la soluzione che maggiormente si avvicina a tale inclinazione nel rispetto dei requisiti energetici e dimensionali definiti per l'installazione.
- I moduli fotovoltaici a film sottile a base di tellururo di cadmio hanno, sulla base degli studi ambientali analizzati, performance di produzione energetica inferiori ma un impatto ambientale significativamente minore rispetto ai moduli a base di silicio monocristallino. Il minor utilizzo di risorse e materiali, e i processi di produzione meno energivori corrispondono sia ad un minor impatto ambientale che ad un costo di produzione inferiori rispetto alle alternative a base di silicio monocristallino. Il costo del modulo fotovoltaico è però anche determinato da ulteriori fattori, che possono comportare un prezzo di listino maggiore. Questo tipo di moduli è maggiormente indicato per installazioni in cui non si hanno restrizioni particolari di superficie. Il tempo di pareggiamento è il minore per le tipologie di moduli fotovoltaici monofacciali analizzati. Nonostante ciò, rimangono alcune criticità riguardo il potenziale impiego di questi moduli legati all'approvvigionamento delle materie prime e alla loro gestione a fine vita.
- I moduli fotovoltaici monofacciali ad eterogiunzione hanno l'impatto ambientale maggiore, performance energetiche simili ai moduli di silicio monocristallino ma un costo stimato superiore.
- Le caratteristiche tecniche medie specifiche per i modelli di moduli fotovoltaici monofacciali analizzati vengono riportate di seguito, Tabella 51.

Tabella 51 Caratteristiche tecniche medie dei moduli fotovoltaici monofacciali analizzati.

Struttura	Potenza Output media (W)	Area media (m ²)	W/m ²
ABC	670	2.7	248.1
HPBC	580	2.58	224.8
TOPCon	481	2.15	223.3
HJT	433	1.96	220.7
PERC	505	2.38	212.5
CdTe	495	2.64	187.9

- Si suggerisce, in generale, di favorire l'uso di materiali strutturali a basso impatto ambientale, come acciaio riciclato o alluminio riciclato o promuovere tecnologie innovative con basso consumo di risorse critiche e ridotto impatto ambientale.

9.1.2 Indicazioni per installazioni su copertura piane

Queste indicazioni sono state elaborate per fornire informazioni e linee guida riguardo ad impianti fotovoltaici su coperture piane di edifici, installati per mezzo di strutture di supporto, sostegno ed ancoraggio. Il caso di impianti fotovoltaici integrati, a sostituzione di una porzione dell'edificio, non è stato trattato. Questo tipo di installazioni può includere sia di moduli fotovoltaici monofacciali, in grado di assorbire la luce solare unicamente dalla faccia frontale esposta al sole, che moduli fotovoltaici bifacciali, capaci di assorbire la luce solare da entrambe le facce.

- Nel caso di installazione di moduli fotovoltaici monofacciali le indicazioni definite per le installazioni su coperture spioventi rimangono valide, con particolare attenzione ai parametri di orientamento ed inclinazione che in questo caso sono meno soggetti a vincoli strutturali dell'edificio.
- Qualora si fosse in presenza di una superficie riflettente che garantisca un aumento della produzione energetica dovuto all'assorbimento della faccia posteriore superiore al 20% di quanto prodotto dalla faccia anteriore, si suggerisce di considerare l'installazione di moduli fotovoltaici bifacciali.
- I moduli bifacciali ad eterogiunzione hanno l'impatto ambientale minore, le performance di produzione energetica migliore ma possono essere soggetti ad un costo superiore rispetto ad altre alternative bifacciali.
- Tra le alternative a base di silicio monocristallino, i moduli TOPCon mostrano il minor impatto ambientale, escludendo strutture più recenti come HPDC e ABC, per cui il numero di studi analizzato non viene considerato significativo per definire dei requisiti minimi o consigliati

- Le caratteristiche tecniche medie specifiche per i modelli di moduli fotovoltaici bifacciali analizzati vengono riportate di seguito, Tabella 52.

Tabella 52 Caratteristiche tecniche medie dei moduli fotovoltaici bifacciali analizzati.

Struttura	Potenza Output media (W)	Area media (m ²)	W/m ²
ABC	660	2.7	244.4
TOPCon	535	2.35	237.8
HJT	680	2.93	232.1
HPDC	590	2.58	228.7
PERC	557	2.59	215.1

- Si suggerisce, in generale, di favorire l'uso di materiali strutturali a basso impatto ambientale, come acciaio riciclato o alluminio riciclato o promuovere tecnologie innovative con basso consumo di risorse critiche e ridotto impatto ambientale.

9.2 Indicazioni per installazioni pensiline fotovoltaiche

Queste indicazioni sono state elaborate per fornire informazioni e linee guida riguardo a pensiline fotovoltaiche. Questo tipo di installazioni richiede l'impiego di moduli fotovoltaici monofacciali, in grado di assorbire la luce solare unicamente dalla faccia frontale esposta al sole. Poiché la superficie disponibile per l'installazione è limitata, si definiscono, in base all'analisi delle caratteristiche tecniche e delle performance ambientali dei modelli analizzati (vedi Tabella 36 e Figura 12, Figura 14, Figura 15), le seguenti indicazioni.

- Le indicazioni definite per le installazioni su coperture spioventi sono valide anche per questo tipo di installazioni, prestando particolare attenzione ai parametri di orientamento ed inclinazione che in questo caso sono meno soggetti a vincoli strutturali di un edificio.
- Si suggerisce di favorire l'uso di materiali strutturali a basso impatto ambientale, come acciaio riciclato o alluminio riciclato e cementi a basse emissioni¹. Nella fattispecie si propone l'uso di strutture non zavorrate o con sistemi di zavorra a ridotto impatto poiché riducono l'impatto ambientale dell'impianto. Sistemi di zavorra a ridotto impatto possono includere cementi a basse emissioni di CO₂, ancoraggio alla pavimentazione esistente e ancoraggio mediante pali infissi.
- Si suggerisce, inoltre, di specificare requisiti per la durabilità delle strutture, utilizzando materiali resistenti e adatti all'esposizione prolungata ad agenti atmosferici. Al fine di ridurre l'impatto

¹ I cementi a basse emissioni sono leganti idraulici progettati per ridurre l'impatto ambientale legato alla loro produzione e utilizzo. Questi cementi si distinguono per l'impiego di materie prime alternative, processi di produzione ottimizzati e tecnologie innovative per la riduzione dell'impronta di carbonio.

ambientale complessivo del sistema solare è infatti importante assicurarsi della longevità e mantenimento della struttura per un tempo superiore a quello stimato di servizio per i moduli fotovoltaici.

- Prospetticamente, considerare l'integrazione con sistemi di accumulo energetico e distribuzione su rete locale secondo una logica di comunità energetiche.

9.3 Indicazioni per pareri riguardo installazioni agrivoltaico e campi fotovoltaici

- Privilegiare moduli con un impatto per Wp che sia inferiore alla media degli studi (vedere Tabella 36 e Tabella 37) e riportati di seguito in Tabella 53.

Tabella 53 Indici d'impatto ambientale medi per unità funzionale watt picco di moduli fotovoltaici monofacciali e bifacciali.

MODULI FOTOVOLTAICI MONOFACCIALI

Unità di misura	Categoria d'impatto	PERC	HJT	TOPCon	CdTe	HPBC	ABC
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	5.72E-01	8.38E-01	4.85E-01	3.45E-01	5.70E-01	5.52E-01
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	5.37E-03	3.87E-03	2.76E-03	2.10E-03	1.34E-02	5.76E-03
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	5.67E-01	8.34E-01	4.83E-01	3.42E-01	6.38E-01	5.50E-01
kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	6.36E-04	6.78E-04	4.10E-04	3.77E-04	3.73E-04	3.68E-04
Kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	1.18E-07	8.67E-08	1.88E-07	2.18E-08	8.76E-08	6.02E-07
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	3.74E-03	6.77E-03	3.15E-03	2.32E-03	4.32E-03	3.52E-03
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	1.22E-04	4.57E-05	1.25E-04	1.54E-05	2.02E-04	1.68E-04
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	7.87E-04	1.12E-03	7.17E-04	4.35E-04	9.71E-04	9.61E-04
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	7.94E-03	1.19E-02	6.94E-03	5.06E-03	8.98E-03	7.29E-03
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	2.79E-03	4.14E-03	2.12E-03	1.45E-03	3.27E-03	2.03E-03
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	3.79E-05	6.75E-05	2.16E-05	3.50E-05	3.87E-05	2.07E-05
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	6.57E+00	1.01E+01	5.47E+00	4.32E+00	6.41E+00	5.81E+00
m ³	Consumo risorse Idriche	4.59E-01	4.43E-01	2.77E-01	7.34E-02	6.53E-01	2.39E-01

MODULI FOTOVOLTAICI BIFACCIALI

Unità di misura	Categoria d'impatto	PERC	HJT	TOPCon	HPDC	ABC
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Totale	6.65E-01	4.38E-01	5.90E-01	3.94E-01	5.29E-01
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Biogenico	3.76E-03	3.03E-03	3.93E-03	1.95E-03	2.27E-03
kg CO ₂ eq.	Riscaldamento Globale - Fossile	6.61E-01	4.34E-01	5.86E-01	3.91E-01	5.27E-01

kg CO ₂ eq.	Riscaldato Globale - LULUC	8.09E-04	3.73E-04	5.21E-04	4.04E-04	3.63E-04
Kg CFC11 eq.	Consumo Ozono Stratosfera	5.19E-08	1.29E-08	4.09E-08	9.38E-09	2.63E-08
mol H ⁺ eq.	Acidificazione	4.11E-03	2.60E-03	3.95E-03	2.52E-03	3.63E-03
kg P eq.	Eutrofizzazione - Acqua Dolce	7.23E-05	1.01E-04	1.05E-04	1.10E-04	1.71E-04
kg N eq.	Eutrofizzazione - Mare	8.26E-04	5.89E-04	8.20E-04	5.71E-04	9.78E-04
mol N eq.	Eutrofizzazione - Terrestre	8.59E-03	5.87E-03	8.35E-03	5.71E-03	7.51E-03
kg NMVOC eq.	Formazione Fotochimica Ozono	2.96E-03	1.70E-03	2.89E-03	1.68E-03	2.07E-03
kg Sb eq	Consumo Risorse - Minerali/metalli	4.02E-05	2.14E-05	2.67E-05	1.66E-05	2.12E-05
MJ	Consumo Risorse - Combustibili fossili	7.90E+00	5.18E+00	6.26E+00	4.66E+00	5.78E+00
m ³	Consumo risorse Idriche	4.90E-01	3.41E-01	2.52E-01	4.32E-01	2.37E-01

- Si suggerisce di richiedere studi LCA specifici per i progetti con un prospetto sul tempo di pareggiamento che in generale sia inferiore ai 4 anni nel caso di installazione senza tracker solari.
- Garantire un orientamento vicino ai 40° prevedendo dove possibile l’inclusione di tracker solari per massimizzare la produzione di energia.
- Si suggerisce, inoltre, di specificare requisiti per la durabilità delle strutture, utilizzando materiali resistenti e adatti all’esposizione prolungata ad agenti atmosferici. Al fine di ridurre l’impatto ambientale complessivo del sistema solare è infatti importante assicurarsi della longevità e mantenimento della struttura per un tempo superiore a quello stimato di servizio per i moduli fotovoltaici.

10. Riferimenti

- ISO 14040:2006, *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*.
- ISO 14044:2006, *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*.
- ISO14025:2006 *Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and procedures*.
- EN 15804:2012+A2:2019+AC:2021, *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*.
- *General Programme Instructions for the International EPD System, Version 5.0.0, 2024*
- *NPCR Part A: Construction Products and services, Version 2.0, 2021*
- *NPCR 029 Part B for photovoltaic modules used in the building and construction industry, including production of cell, wafer, ingot block, solar grade silicon, solar substrates, solar superstrates and other solar grade semiconductor materials, Version 1.2, 2022.*
- Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) Online Tool
https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html
- R. Frischknecht, P. Stolz, L. Krebs, M. de Wild-Scholten, P. Sinha, V. Fthenakis, H. C. Kim, M. Raugei, M. Stucki, 2020, *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems*, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-19:2020
- K. Wambach, C. Libby, S. Shaw, 2024, *Advances in Photovoltaic Module Recycling Literature Review and Update to Empirical Life Cycle Inventory Data and Patent Review*, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-28:2024
- K. Komoto, M. Held, C. Agrafeil, C. A. Garcia, A. Danelli, J. Lee, F. Lyu, J. Bilbao, R. Deng, G. Heath, D. Ravikumar, P. Sinha, 2022, *Status of PV Module Recycling in Selected IEA PVPS Task12 Countries*, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-24:2022
- N. Jungbluth, M. Stucki, K. Flury, R. Frischknecht, and S. Büsser, *Life Cycle Inventories of Photovoltaics*, ESU-services Ltd., Uster, Switzerland, 2012