

Le indicazioni operative elencate di seguito sono frutto di uno studio di analisi del ciclo di vita (LCA abbreviato da Life Cycle Assessment) secondo la norma ISO 14040 e 14044 dalla culla alla tomba di moduli fotovoltaici e servizi per la produzione di energia elettrica da fotovoltaico. L'obiettivo dello studio è di fornire al Comune di Parma 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". In questo studio sono stati dapprima analizzati e confrontati i profili ambientali di 41 studi certificati di moduli fotovoltaici facenti riferimento alla Regola di Categoria di Prodotto, NPCR 029 Parte B. Le Regole di Categoria di Prodotto (PCR abbreviato da Product Category Rules) 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. Tali dichiarazioni ambientali sono inoltre garantite e certificate da programmi di ecolabel di tipo III, enti che si prepongono di fornire informazioni riguardo gli aspetti ambientali di prodotti, attività o servizi sulla base di dati quantificati e verificati da terze. Sono state, quindi, evidenziate le maggiori criticità ambientali legate alle diverse caratteristiche dei moduli fotovoltaici quali: materiale 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 determinato il profilo ambientale per le unità funzionali di un Wp e un kWh in condizioni di installazione predefinite. Inoltre, sono stati modellizzati ed analizzati tre sistemi per la produzione di energia elettrica da fotovoltaico adatti all'installazione in un contesto urbano e di interesse per il Comune di Parma: 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, quantificando anche il tempo stimato di raggiungimento della Neutralità Carbonica secondo diversi parametri di installazione quali orientamento e inclinazione.

1. Indicazioni operative per l'installazione di moduli fotovoltaici

1.1 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.

1.1.1 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 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 1.

Tabella 1 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.

1.1.2 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 2.

Tabella 2 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.

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

1.3 Indicazioni per pareri riguardo installazioni agrivoltaico e campi fotovoltaici

- ▶ Privilegiare moduli con un impatto per Wp che sia inferiore alla media degli studi e riportata di seguito in Tabella 3.
- ▶ 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.

Tabella 3 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.	Riscaldamento Globale - LULU	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.	Riscaldamento Globale - LULU	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	
m³	Consumo Risorse Idriche	4.90E-01	3.41E-01	2.52E-01	4.32E-01	2.37E-01	