



ASPETTI DI SOSTENIBILITÀ DEL FOTOVOLTAICO

Gli autori affrontano il tema della sostenibilità dei sistemi fotovoltaici, offrendo una panoramica delle metriche che concorrono alla sua determinazione e introducendo la metodologia Life Cycle Assessment (LCA) per la valutazione degli impatti ambientali. Particolare enfasi è rivolta al fotovoltaico emergente, al fine di garantire una progettazione secondo i principi di eco-design.

Negli ultimi anni, il fotovoltaico ha assunto un ruolo sempre più cruciale nella transizione energetica grazie all'elevato potenziale applicativo e alle buone prestazioni ambientali. In quanto alimentato da una fonte di energia rinnovabile, è comunemente considerato intrinsecamente sostenibile. Tuttavia, determinare cosa qualifica una tecnologia 'sostenibile' richiede un'analisi a più livelli e non la mera valutazione delle prestazioni del dispositivo durante il suo funzionamento [1]. Una valutazione completa, infatti, include l'intero ciclo di vita del dispositivo, dall'approvvigionamento delle materie prime alla fabbricazione del dispositivo fino allo smontaggio ed eventuale recupero dei materiali dopo lo smaltimento. In modo particolare, due sono le fasi che incidono di più nella valutazione della sostenibilità delle tecnologie fotovoltaiche: la fase di produzione (incluso lavorazione/trattamento delle materie prime) e il fine vita, in quanto la fase operativa contribuisce al profilo ambientale con impatti sostanzialmente trascurabili.

Definire la sostenibilità di un dispositivo fotovoltaico implica, quindi, dover tener conto di fattori ambientali, economici e sociali in ogni fase della filiera del prodotto secondo i principi di eco-design [2]. Questo approccio permette di individuare le criticità associate ad ogni fase del ciclo di vita e, di conseguenza, intervenire sul sistema fotovoltaico ed ottimizzarlo, guidando il processo decisionale e di sviluppo/innovazione verso pratiche e risultati più sostenibili.

Un quadro di riferimento per la valutazione delle prestazioni ambientali delle tecnologie fotovoltaiche

che può essere fornito dagli aspetti misurabili della sostenibilità. In modo particolare, la sostenibilità ambientale di un dispositivo fotovoltaico può essere determinata misurando il tempo che un impianto necessita per generare la stessa quantità di energia utilizzata nel processo di produzione, installazione, funzionamento e smantellamento (*Energy Payback Time, EPBT*) e calcolando le emissioni di gas serra associate all'intero ciclo di vita (*Carbon footprint, Ecological footprint*). Inoltre, è necessario quantificare i materiali e le risorse consumati, comprese le materie prime, l'acqua e l'energia necessaria [3], al fine di supportare una progettazione più attenta durante le prime fasi di sviluppo, individuando le eventuali criticità e facilitando l'implementazione di modifiche [2].

Affrontare il tema della sostenibilità significa includere anche ciò che concerne l'aspetto economico e, quindi, valutare la competitività delle tecnologie fotovoltaiche in termini di efficienza dei costi rispetto alle fonti energetiche convenzionali [4]. La sostenibilità economica può essere determinata calcolando il costo medio dell'elettricità generata da un impianto fotovoltaico, tenendo conto dell'investimento iniziale, del funzionamento e della manutenzione (*Levelized Cost of Electricity, LCOE*) e analizzando i ritorni finanziari o i benefici generati, come il risparmio energetico, i ricavi dalle vendite di elettricità e gli incentivi governativi (*Investment payback time, IPBT*).

Ultimo ma non meno importante è l'aspetto sociale che deve essere tenuto particolarmente in considerazione, affinché il benessere delle comunità

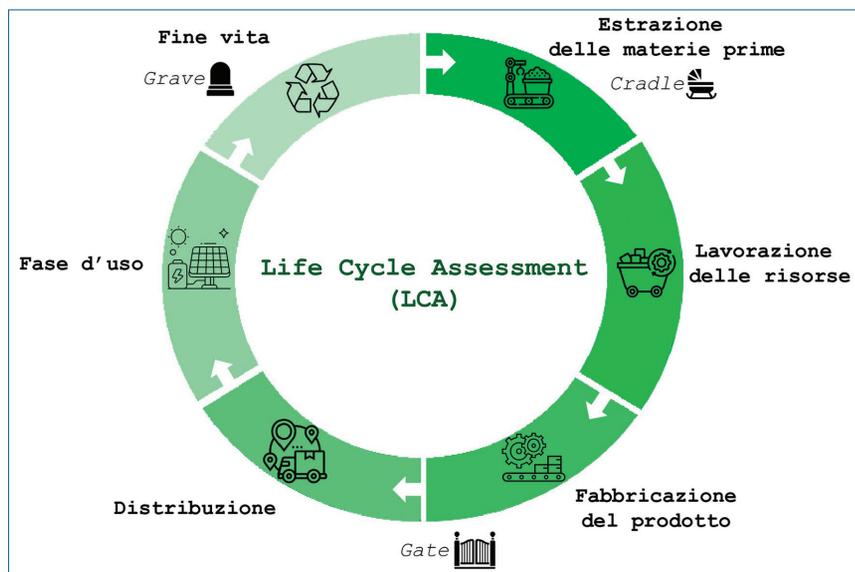


Fig. 1 - Fasi della metodologia *Life Cycle Assessment*. Parte della figura è stata fatta utilizzando [Flaticon.com](https://www.flaticon.com)

samente. Analisi LCA di questo tipo si definiscono *cradle-to-grave*. Al contrario, se la fase d'uso e la gestione del fine vita non vengono valutati, l'analisi LCA è del tipo *cradle-to-gate* (Fig. 1).

L'LCA è una metodologia standardizzata da norme internazionali (ISO 14040 e ISO 14044) e ciò garantisce coerenza e comparabilità tra diversi studi [9]. Inoltre, può essere integrata con altri tipi di valutazioni, come l'analisi economica (*Life Cycle Costing, LCC*) e la valutazione sociale (*Social Life Cycle Assessment, S-LCA*), per fornire una comprensione più completa delle questioni di sostenibilità e supportare il processo decisionale multicriterio [10].

possa essere garantito a lungo termine. Ciò implica il coinvolgimento dei portatori di interesse nella costruzione della catena del valore e nel processo decisionale, ponendo l'attenzione sulle opportunità di lavoro generate dall'industria fotovoltaica e determinando i rischi per la salute e la sicurezza associati alla produzione, installazione e manutenzione degli impianti fotovoltaici [5].

Focalizzando l'attenzione sulle valutazioni ambientali, diverse tipologie di analisi possono contribuire a determinare l'eco-profilo dei sistemi fotovoltaici (ad esempio, l'*Ecosystem service value* [6], l'*Ecological footprint* [7] e l'*Emergy analysis* [8]). Tuttavia, quando si cercano risultati oggettivi, la metodologia di valutazione ambientale più utilizzata è il *Life Cycle Assessment (LCA)*, in quanto fornisce una procedura strutturata, sistematica e trasparente per quantificare l'impatto ambientale di un prodotto durante il suo ciclo di vita. La struttura di un'analisi LCA include il processo di definizione degli obiettivi, del campo di applicazione e i suoi confini, l'unità funzionale (FU), l'analisi dell'inventario dei dati del ciclo di vita (flussi di materia ed energia in input ed in output), la valutazione degli impatti e l'interpretazione dei risultati. Questo approccio olistico garantisce che tutti i potenziali impatti ambientali, compresi quelli associati all'estrazione delle risorse, alla produzione, al trasporto e alla gestione dei rifiuti, siano valutati rigoro-

si. In riferimento al fotovoltaico tradizionale, valutazioni complete del ciclo di vita forniscono un quadro degli effetti sistemici dell'adozione della tecnologia, come l'impatto sui mercati energetici e sulle emissioni. In questo contesto, le analisi LCA consentono anche di ottimizzare la gestione del fine vita, individuando soluzioni per estendere la durata dei moduli, migliorare il riciclaggio e quantificare gli impatti delle pratiche di smaltimento [11].

Nell'ambito del fotovoltaico emergente che, negli ultimi decenni, ha suscitato grande interesse nel mondo della ricerca è, invece, possibile applicare una valutazione prospettica del ciclo di vita dei dispositivi (*Prospective LCA*) per comprendere, ad esempio, se questi sistemi possano produrre un'impronta ambientale inferiore rispetto al fotovoltaico tradizionale. Un'analisi LCA si definisce prospettica quando si applica ad una tecnologia (emergente) che è in una fase iniziale di sviluppo (ad esempio, produzione su scala di laboratorio), per calcolare in maniera anticipatoria il suo profilo ambientale proiettando i risultati su scale di produzione e di mercato più estese [12]. In questo modo vengono anche presi in considerazione gli scenari che potrebbero verificarsi durante i processi di scale-up.

Tra le tecnologie emergenti, le celle solari a perovskite (PSCs) stanno suscitando grande interesse per le efficienze di fotoconversione che, su sca-

la di laboratorio, sono comparabili al fotovoltaico in silicio [13]. Diventa importante, quindi, valutare l'eco-profilo di questi dispositivi per una futura produzione su scala industriale. Questo aspetto è, ad esempio, affrontato nel lavoro di E. Leccisi e V. Fthenakis [14]. Gli autori conducono un'analisi "ex ante" di LCA (*from cradle-to-grave*, FU = 1 kWh) delle PSCs a singola giunzione e tandem (perovskite-silicio e perovskite-perovskite), confrontando gli impatti ambientali e la domanda di energia delle PSCs con quelli associati al fotovoltaico convenzionale. Dall'analisi condotta emerge che i punti salienti da migliorare per mitigare gli impatti ambientali delle PSCs nel processo di scale-up sono la fase di produzione, in modo particolare il processo di deposizione, e la sostituzione di alcuni materiali.

Aspetto da non trascurare, sempre in previsione di uno scale-up delle PSCs, è l'implementazione di una strategia ottimale per il fine vita. Nel lavoro di Kipyator *et al.* [15], viene effettuata un'analisi LCA (*from cradle-to-grave*, FU = 1 kWh) delle celle solari tandem perovskite-silicio. Anche in questo caso, la fase di produzione del sistema è quella che contribuisce maggiormente all'impronta ambientale del sistema studiato. Inoltre, gli autori esplorano quattro diverse strategie di riciclo per identificare l'opzione migliore per gestire il fine vita, individuando, a seconda della configurazione del modulo tandem, quali sono i parametri critici per ridurre gli impatti ambientali dell'intero sistema.

La scelta dei materiali è un altro punto critico delle tecnologie fotovoltaiche, in quanto la disponibilità delle materie prime potrebbe essere limitata con l'espansione del fotovoltaico su scala industriale. Ad esempio, nel lavoro di L. Wagner *et al.* [16] viene analizzata la domanda di risorse per la produzione delle PSCs su scala multi-TW, considerando due fattori di criticità, ovvero la capacità estrattiva di minerali e la capacità produttiva di materiali sintetici. In particolare, gravi rischi di approvvigionamento sono stati individuati per una serie di materiali ampiamente utilizzati nelle PSCs, come il cesio nelle leghe di perovskite, l'indio negli elettrodi trasparenti e la maggior parte degli strati di contatto organici.

Inoltre, particolare preoccupazione è rivolta al piombo in prospettiva di una futura commercializ-

zazione. Il lavoro di S. Maranghi *et al.* [17] offre una dettagliata panoramica degli impatti delle PSCs sulla tossicità ambientale e sulla salute umana valutati tramite analisi LCA (*from cradle-to-grave*) e *Risk Assessment*. Dal punto di vista tossicologico, il piombo utilizzato e rilasciato dalle PSCs è estremamente pericoloso per gli organismi viventi. Dal punto di vista dell'LCA, tuttavia, il piombo mostra un peso piuttosto limitato sul profilo ambientale delle PSCs, indicando come questa metodologia debba essere abbinata ad altre tecniche come il *Risk Assessment* per valutazioni di tipo tossicologico.

Analisi LCA sono state anche utilizzate per valutare gli impatti ambientali di altre tipologie di fotovoltaico emergente come, ad esempio, celle solari sensibilizzate a colorante, fotovoltaico inorganico e fotovoltaico organico.

Nello studio di M.L. Parisi *et al.* [18] viene effettuata un'analisi LCA (*from cradle-to-grave*, FU = 1 m²) del processo di produzione a livello preindustriale di DSSM (*Dye-Sensitized Solar Module*) realizzato da Dyepower, un consorzio di centri di ricerca ed aziende. La valutazione della sostenibilità dell'eco-profilo di un DSSM ha evidenziato le buone prestazioni ambientali di questa tecnologia in un ipotetico scenario di fase d'uso come BIPV (*Building-Integrated Photovoltaics*). Tuttavia, si evince che un miglioramento significativo del suo eco-profilo può dipendere maggiormente dalla diminuzione dell'uso di materie prime, privilegiando la scelta di materiali sostenibili.

Risultati comparabili sono stati presentati nel lavoro di A. Maalouf *et al.* [19], che riporta una valutazione LCA (*from cradle-to-gate*, FU = 1 kWh) della produzione di moduli "monograin" con struttura a base di kesterite (*copper zinc tin sulfide*, CZTS). Dallo studio emerge che la maggior parte degli impatti ambientali deriva dall'uso di determinate materie prime, ad esempio l'argento, e che la sostituzione con materiali alternativi renderebbe la tecnologia migliore rispetto al più comune film-sottile CZTS.

Sempre nell'ambito del fotovoltaico inorganico, il lavoro di S. Resalati *et al.* [20] presenta una valutazione LCA (*from cradle-to-gate*, FU = 1 kWh) di quattro celle fotovoltaiche emergenti a base di calcogenuri. Ad efficienze comparabili, queste tecnologie, in particolare quelle a base di antimonio,



offrono gli impatti ambientali più bassi rispetto alle CIGS (*copper indium gallium selenide*) attualmente in commercio. Tuttavia, gli autori concludono che la fase d'uso e il fine vita andrebbero inclusi per un'analisi più completa.

Nel campo del fotovoltaico organico, lo studio di C. Lamnatou e D. Chemisana [21] fornisce un'analisi LCA (*from cradle-to-grave*, $FU = m^2$) del modulo fotovoltaico e del BOS (*Balance of System*), il sistema che include tutti i componenti di un impianto fotovoltaico come cablaggi, inverter solari, batterie ecc. Inoltre, dimostrano che il sistema accoppiato BOS-OPV richiede un minor uso dei materiali 'BOS' e ciò porterebbe ad una riduzione degli impatti ambientali rispetto a quelli prodotti accoppiando il BOS con il fotovoltaico tradizionale. Tuttavia, un elemento da non trascurare è la breve vita dei moduli OPV rispetto alle tecnologie in commercio.

In conclusione, in questo articolo viene approfondito il tema della sostenibilità dei sistemi fotovoltaici, evidenziando il ruolo dell'LCA nella valutazione degli impatti ambientali. Particolare attenzione è rivolta al fotovoltaico emergente, riportando diversi casi studio in cui emergono i molteplici vantaggi dell'impiego dell'LCA come strumento per garantire una corretta progettazione secondo i principi di eco-design. La limitata disponibilità di banche dati per condurre analisi LCA sul fotovoltaico emergente è un aspetto critico che potrebbe, in linea di principio, compromettere la robustezza dei risultati e la loro comparabilità [17]. D'altra parte, l'innovazione e il progredire della conoscenza su queste tecnologie, combinati con analisi di sostenibilità avanzate ed integrate, garantisce un valido supporto per l'ottimizzazione delle prestazioni dei dispositivi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M.L. Parisi, A. Sinicropi, *Nature Sustainability*, 2021, **4**, 754.
- [2] L. Kong, L. Wang *et al.*, *J. Clean. Prod.*, 2022, **363**, 132516.
- [3] L. Dong, Y. Gu, *et al.*, *Solar Energy*, 2024, **269**, 112360.
- [4] L. Liu, W. Liu *et al.*, *J. Clean. Prod.*, 2024, **434**, 139730.
- [5] A. Anand, R.A.P. Verayiah *et al.*, *J. Build. Eng*, 2024, **82**, 108232.
- [6] S. Sannigrahi, S. Chakraborti *et al.*, *J. Environ. Manage.*, 2019, **244**, 208.
- [7] M.S. Mancini, A. Galli *et al.*, *Ecol. Indic.*, 2016, **61**, 390.
- [8] C. Zhang, B. Su *et al.*, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2024, **192**, 114201.
- [9] R. Finkbeiner, M. Inaba *et al.*, *Int. J. Life Cycle Assess.*, 2006, **11**, 80.
- [10] H. Ahmad, G. Chhipi-Shrestha, *Woohead Publishing in Materials Selection for Sustainability in the Built Environment*, 2024, **2**, 17.
- [11] D. Mao, S. Yang *et al.*, *J. Clean. Prod.*, 2024, **434**, 140320.
- [12] R. Arvidsson, A. Tillman *et al.*, *J. Ind. Ecol.*, 2022, **22**, 1286.
- [13] N. National Renewable Energy Laboratory, Best research-cell efficiency chart [Online], available at: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [14] E. Leccisi, V. Fthenakis, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, 2021, **29**, 1078.
- [15] M.J. Kipyator, F. Rossi *et al.*, *Sustain. Energy Fuels*, 2024, Advance Article.
- [16] L. Wagner, J. Suo *et al.*, *Joule*, 2024, **8**, 1142.
- [17] S. Maranghi, M.L. Parisi *et al.*, *Open Res. Eur.*, 2021, **1**, 1.
- [18] M.L. Parisi, S. Maranghi *et al.*, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2020, **121**, 109703.
- [19] A. Maalouf, T. Okoroafor *et al.*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2023, **251**, 112161.
- [20] S. Resalati, T. Okoroafor *et al.*, *Appl. Energy*, 2022, **313**, 118888.
- [21] C. Lamnatou, D. Chemisana, *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2023, **56**, 103062.

Sustainability Issues of Photovoltaics

The authors address the sustainability of photovoltaic systems, providing an overview of the required metrics to determine it. Life Cycle Assessment (LCA) methodology for evaluating the environmental impacts of photovoltaics, focusing on emerging technologies to guarantee an eco-design is introduced.