

# Riciclo dei pannelli fotovoltaici in silicio cristallino

..... Marco Tammaro, Responsabile del Laboratorio ENEA Tecnologie per il Riutilizzo, il Riciclo, il Recupero e la valorizzazione di Rifiuti e Materiali .....

Il solare fotovoltaico sta diventando una fonte di energia alternativa sempre più importante. Infatti, è la terza tecnologia di energia rinnovabile in termini di produzione di elettricità, dopo l'energia idroelettrica e l'eolico terrestre (1). Alla fine del 2019, la capacità fotovoltaica installata a livello globale era circa 627 GW e la sua quota nella produzione di energia elettrica superava il 3% a livello mondiale e ammontava a circa il 5% nell'Unione Europea (IEA-PV) (2). Nel 2022, in Italia, si registrano 25.064 MW di potenza installata (3).

Questa notevole crescita della capacità fotovoltaica è associata a un numero sempre maggiore di impianti fotovoltaici che, nei prossimi anni, si trasformeranno in un'enorme quanti-

tà di rifiuto da trattare. Nel 2016 sono state generate circa 45.000 tonnellate di rifiuti fotovoltaici a livello globale e, secondo l'Agenzia IRENA, la quantità di rifiuti fotovoltaici raggiungerà 1,7-8 milioni di ton entro il 2030 e 60-78 milioni di ton entro il 2050 (4).

Inoltre, i pannelli fotovoltaici (PV) a fine vita, se non gestiti correttamente, possono rappresentare una minaccia per la salute umana e l'ambiente (5; 6). Infatti, contengono sostanze pericolose come piombo, cadmio, cromo e nichel (7; 8).

Il tema del riciclo dei PV è senza dubbio un punto di contatto tra Comunità Energetiche ed Economia Circolare. Quella che oggi è una grande opportu-

nità per la transizione energetica del nostro Paese deve infatti trasformarsi in una ancor più grande occasione per il trattamento sostenibile del "fine vita" di queste vere e proprie miniere di materiali preziosi e utili per futuri impieghi.

I PV contengono materiali convenzionali, come vetro, materie critiche, come alluminio (Al), e strategiche, come il rame (Cu), oltre a metalli preziosi, come l'argento (Ag), ed ovviamente il silicio (Si). Questi materiali potrebbero essere recuperati e riutilizzati in diverse catene di produzione o essere reimmessi nel settore fotovoltaico (9), ottenendo una riduzione dell'utilizzo delle risorse naturali e sostenendo la crescente quantità di installazioni solari in linea con i principi dell'economia circolare (10).

Si stima che, nell'area dell'Unione Europea, la quantità di Si necessario per il settore fo-

tovoltaico dovrebbe aumentare da 33 kton, nel 2015, a 235 kton, nel 2030 (11). Il recupero di materiali ad alta intensità energetica, quali Si ed Al, comporta un consumo di energia inferiore a quella necessaria per l'estrazione. Ad esempio, la produzione di Al riciclato richiede solo 1/20 dell'energia del corrispondente materiale vergine, pur avendo la stessa qualità (12). Di conseguenza, con il riciclo diminuiscono anche le emissioni di carbonio associate alla produzione di energia e, quindi, l'impatto ambientale complessivo della tecnologia fotovoltaica risulta minore (12; 5).

In Italia, basandoci sui dati relativi all'evoluzione della potenza installata negli ultimi decenni, e tenendo conto che per ogni MW installato si valuta che si producono all'incirca 80 ton di rifiuto, possiamo avere una stima dell'andamento dei rifiuti fotovoltaici in Italia per i prossimi anni, ipotizzando una durata media dei pannelli di 25 anni (Fig. 1)

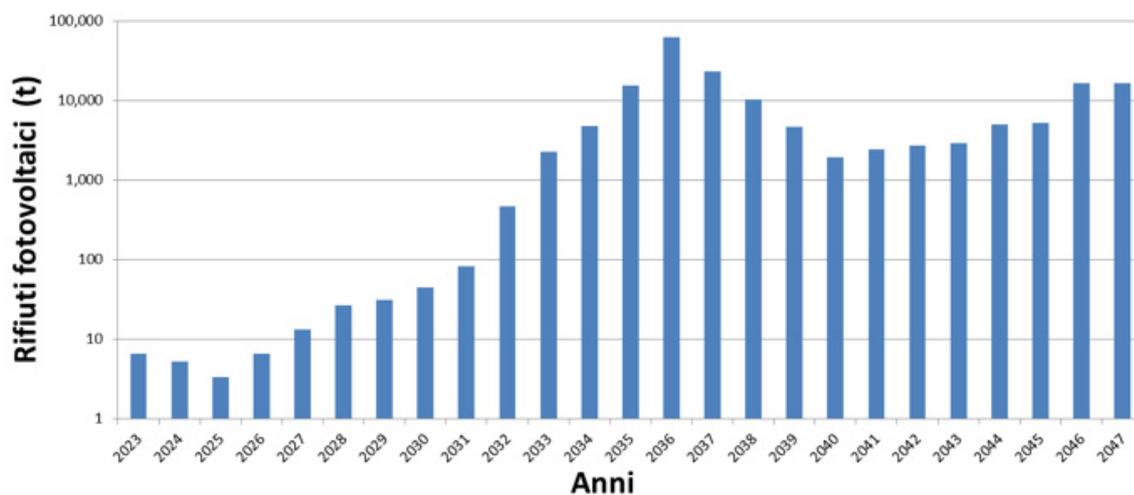


Figura 1. Stima della quantità di rifiuti fotovoltaici prodotti in Italia nei prossimi 25 anni (elaborazione da fonti varie)

Incrociando i suddetti dati con la tipica composizione di un pannello fotovoltaico in silicio cristallino (c-Si), è possibile tirare fuori una previsione delle quantità di alcuni materiali recuperabili dai rifiuti fotovoltaici nei prossimi decenni, solo in Italia.

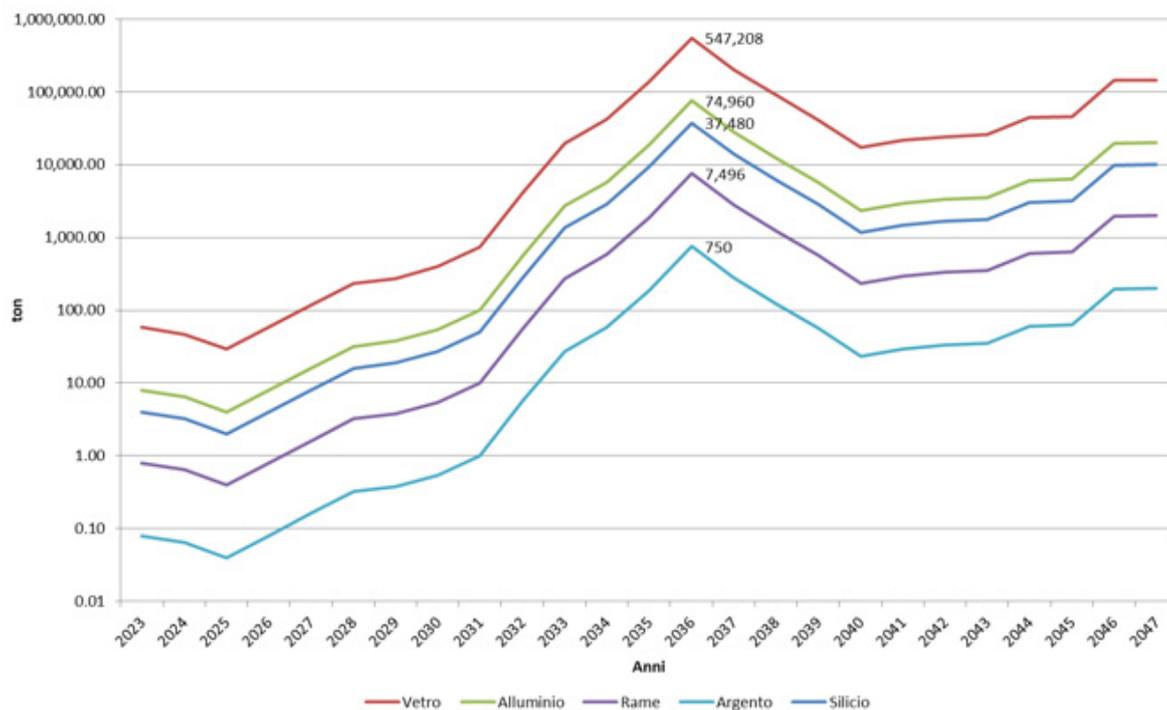


Figura 2. Stima delle quantità di alcuni materiali presenti nei rifiuti fotovoltaici in Italia nei prossimi decenni, con ipotesi di durata dei pannelli di 25 anni (elaborazione da fonti varie)

Lo smaltimento dei pannelli fotovoltaici è regolato dal D.Lgs n. 49/2014 e s.m.i. che recepisce la Direttiva 19/2012/UE. Sono queste norme ad aver identificato i rifiuti fotovoltaici come RAEE, un aspetto fondamentale che ha permesso di iniziare a trattarli correttamente, stabilendo le percentuali di recupero.

La normativa prevede l'obbligo di raggiungere almeno l'85% in peso di recupero. Un valore che può essere raggiunto principalmente mediante il recupero del vetro e della cornice in alluminio in quanto i pannelli sono costituiti per il 70% da vetro e per il 15% dalla cornice. Il restante 15% è quello su cui la ricerca si concentra maggiormente poiché è quello che contiene altri metalli importanti, ovvero la parte più preziosa e che ha anche richiesto un maggior dispendio di energia in fase di produzione.

Quindi, recuperando solo il vetro e la cornice in alluminio, sarebbe possibile ottenere

gli obiettivi fissati dalla Direttiva. Tuttavia, il processo di riciclo del fotovoltaico può diventare ancora più economicamente ed ambientalmente sostenibile, se vengono recuperati altri materiali di valore, come Si, Ag e Cu. Attualmente, la tecnologia fotovoltaica basata sul silicio cristallino è la più diffusa in tutto il mondo (13). Pertanto, la maggior parte dei rifiuti fotovoltaici deriva da questa tipologia di pannelli.

Negli ultimi anni sono stati sviluppati vari metodi di riciclo volti al recupero di diversi materiali, oltre a vetro e Al (14). In Italia ci sono, attualmente, diverse aziende specializzate nel riciclo di RAEE che offrono come servizio il trattamento dei pannelli fotovoltaici. Nella maggior parte dei casi si tratta di processi di tipo meccanico (quindi triturazione e vibrovagliatura per separare i componenti) poiché consolidati e applicati anche su altre tipologie di RAEE.

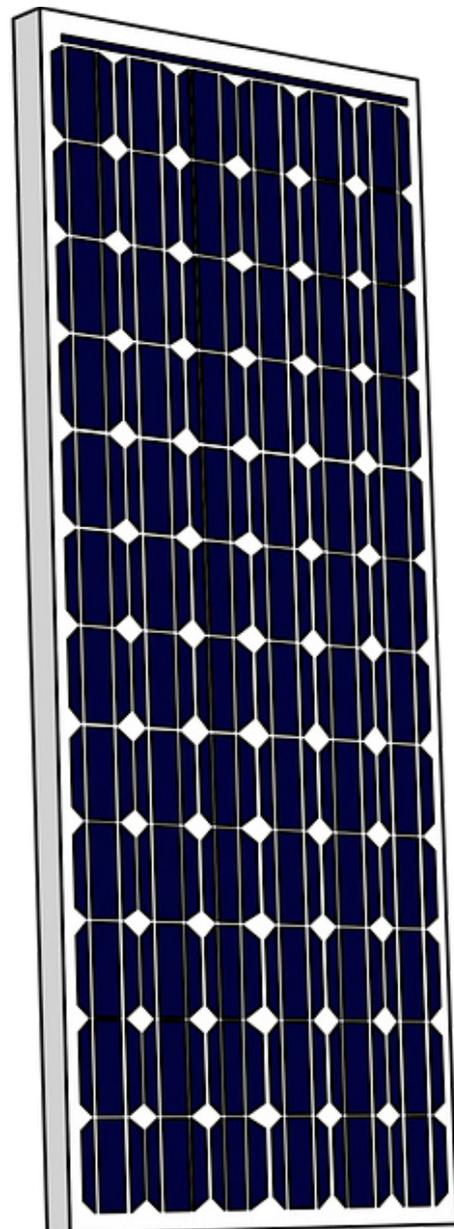
Dal punto di vista della ricerca, è importante

sottolineare che è fondamentale sviluppare metodi innovativi e sostenibili per il riciclo. Il Dipartimento SSPT di ENEA è impegnato da diversi anni in un approccio integrato con cui recuperare il più possibile del rifiuto fotovoltaico, in ottica di Economia Circolare. Di seguito alcuni esempi di attività svolte nel settore del riciclo dei PV.

- Con il progetto RESIELP, (finanziato da European Institute of Innovation and Technology, EIT, RawMaterials), SSPT ha contribuito a realizzare in Italia un prototipo per il recupero di sostanze preziose come Si e Ag, nonché di materiali come vetro, Al e Cu, dai PV c-Si. Il processo sviluppato è stato valutato anche sotto il punto di vista dell'impatto Ambientale (15).
- Con il progetto IEMAP (finanziamento Programma Mission Innovation) SSPT ha realizzato un prototipo per il trattamento dei pannelli fotovoltaici in silicio cristallino basato su un brevetto ENEA-Beta-Tech Srl. Si tratta di un processo che si può definire "termico light" perché l'obiettivo è quello di distruggere il meno possibile e recuperare il più possibile, anche l'EVA ed il backsheet. Con questo brevetto si punta infatti a recuperare il 100% dei componenti principali dei pannelli e a farlo con bassi consumi energetici e con scarse emissioni gassose.
- Di recente, (finanziamento HORIZON – IA), è stato finanziato il progetto EVERPV, grazie al quale si implementerà ulteriormente il processo brevettato, oltre a sviluppare procedure idrometallurgiche per ottimizzare il recupero dell'argento e del rame.
- Con il progetto PARSIVAL (finanziamento EIT RawMaterials), si vogliono porre le basi per la realizzazione di una catena di valore per il refurbishment dei pannelli dismessi da destinare ad una seconda vita, e il recupero e riutilizzo di materiali critici

dai pannelli non più riutilizzabili. Si svilupperà nella Regione Puglia, che è la prima regione italiana per potenza fotovoltaica installata (2.9 GW).

In conclusione, è probabile che in futuro non esisterà un'unica soluzione tecnologica per il trattamento dei pannelli fotovoltaici a fine vita, ma diverse, separate o in combinazione fra loro, in modo da tener conto delle peculiarità di questo particolare RAEE. In ogni caso lo scopo dovrà essere quello di recuperare il più possibile ed in modo sostenibile.



## Bibliografia

1. Bahar, H., Bojek, P., 2020. Solar PV Tracking report :  
a. <https://www.iea.org/reports/solar-pv#tracking-progress>
2. IEA-PVPS, 2020. Task 1- 37:2020. Strategic PV Analysis and Outreach – 2020 Snapshot of Global PV; Markets. [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA\\_PVPS\\_Snapshot\\_2020.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA_PVPS_Snapshot_2020.pdf)
3. GSE, Rapporto statistico solare fotovoltaico 2022; [https://www.gse.it/documenti\\_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/GSE%20-%20Solare%20Fotovoltaico%20-%20Rapporto%20Statistico%202022.pdf](https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/GSE%20-%20Solare%20Fotovoltaico%20-%20Rapporto%20Statistico%202022.pdf)
4. IRENA and IEA-PVPS (2016), "End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels" International Renewable Energy Agency and International Energy Agency Photovoltaic Power Systems. [https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena\\_ieapvps\\_end-oflife\\_solar\\_pv\\_panels\\_2016.pdf](https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_ieapvps_end-oflife_solar_pv_panels_2016.pdf)
5. Deng, R., Chang, N.L., Ouyang, Z., Chong, C.M., 2019. A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 109, 532–550. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.020>
6. Tammara, M., Rimauro, J., Fiandra, V., Salluzzo, A., 2015. Thermal treatment of waste photovoltaic module for recovery and recycling: experimental assessment of the presence of metals in the gas emissions and in the ashes. *Renew. Energy* 81, 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.014>
7. Aryan V., Font - Brucart M., Daniel Maga D., 2018. A comparative life cycle assessment of end- of- life treatment pathways for photovoltaic backsheets. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 26, 443 – 459. <https://doi.org/10.1002/pip.3003>
8. Tammara, M., Salluzzo, A., Rimauro, J., Schiavo, S., Manzo, S., 2016. Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels. *J. Hazard. Mater.* 306, 395-405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.12.018>
9. Raw Material Information System (RMIS), 2020. <http://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=policies-and-definitions-2d5b5e>
10. Faircloth, C.C., Wagner, K.H., Woodward, K.E., Rakkwamsuk, P., Gheewala, S.H., 2019. The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand. *Resour. Conserv. Recycl.* 143, 260–272. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.008>
11. European Commission (EC), 2018. Commission Staff Working Document – Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy. SWD (2018) 36 final.
12. FIRE - Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia. Guida al fine vita degli impianti fotovoltaici. <https://www.fire-italia.org/prova/wp-content/uploads/2014/03/Guida-al-fine-vita-degli-impiantifotovoltaici.pdf>
13. Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A.L., Yang, C., 2018. Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste Manag.* 75, 450–458. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.036>
14. Pagnanelli, F., Moscardini, E., Granata, G., Abo Atia, T., Altimari, P., Havlik, T., Toro, L., 2017. Physical and chemical treatment of end of life panels: An integrated automatic approach viable for different photovoltaic technologies. *Waste Manag.* 59, 422.-431 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.011>.
15. Ansanelli G., Fiorentino G., Tammara M., Zucaro A., A Life Cycle Assessment of a recovery process from End-of-Life Photovoltaic Panels May 2021 *Applied Energy* 290(4):116727 DOI:10.1016/j.apenergy.2021.116727