

Il modulo fotovoltaico, una miniera di risorse se il fine vita è virtuoso

Individuare metodi sostenibili per lo smaltimento dei moduli fotovoltaici giunti a fine vita è essenziale, tenuto conto della straordinaria crescita del mercato in questi anni e del “life time” di almeno 20-30 anni dei pannelli. Lo sviluppo e l’applicazione di idonee tecniche di riciclaggio consente di arrivare ad un fine vita virtuoso, evitando rilasci di sostanze inquinanti e facendo sì che materiali e componenti recuperati, spesso di alto valore, possano entrare in un nuovo ciclo produttivo, con un risparmio economico, di energia e minore impatto per salute e ambiente.

DOI 10.12910/EAI2020-055

di **Laura Maria Padovani e Paola Carrabba**, Servizio monitoraggio e valutazione delle tecnologie, Unità Studi, Analisi e Valutazioni, ENEA

Circa 2,1 milioni di tonnellate di pannelli solari da smaltire nel 2050: questi i numeri del fotovoltaico in Italia valutati da uno studio dell’IRENA (Agenzia Internazionale per l’Energia Rinnovabile) [1]. Con una durata media di 25 anni, ad oggi i pannelli che hanno già raggiunto il fine vita sono pochi: pur tuttavia circa 1.000 tonnellate di rifiuti fotovoltaici sono stati smaltiti in Italia nel 2018. Una montagna di vetro, plastica e silicio che, se trattata correttamente, può diventare una risorsa, in luogo di una vera emergenza ecologica, soprattutto negli anni a venire. Infatti, se l’utilizzo di energia da fotovoltaico viene considerato una scelta “a basso impatto ambientale” in quanto sfrutta una fonte ‘pulita’ quale è il sole, evitando la produzione di gas a effetto serra, numerosi studi [2] [3] evidenziano le criticità del solare fotovoltaico nelle fasi di fine vita a causa del **rischio di rilascio di sostanze altamente inquinanti nel terreno, nelle falde acquifere o in atmosfera**. Ciò è vero, in particolare, se i moduli

vengono **smaltiti tal quali in discarica, o avviati a processi di incenerimento nei quali possono rilasciare sostanze altamente inquinanti nei terreni, nelle falde acquifere o in atmosfera**. Da qui l’importanza della messa a punto di adeguati processi di gestione del fine vita attraverso opportune tecnologie di smaltimento/riciclaggio¹.

Lo sviluppo e l’adozione di tecniche di riciclaggio di elevato valore nell’ambito della gestione del fine vita consentirà di chiudere in maniera virtuosa il ciclo di vita di questi dispositivi, facendo sì che i materiali e i componenti recuperati vengano introdotti in un nuovo ciclo produttivo, con un risparmio in termini energetici ed economici ed una diminuzione degli impatti su ambiente e salute (Tabella 1). Inoltre, la messa a punto di appropriate attività di smaltimento degli impianti fotovoltaici avrà un ruolo strategico per ‘alleggerire’ i condizionamenti sulla catena di approvvigionamento dell’industria fotovoltaica e per il corretto uso di materiali e sostanze in ottica di economia circolare [5].

Pannelli fotovoltaici e Life Cycle Assessment

L’elemento più critico per l’ambiente legato al fine vita dei pannelli fotovoltaici è sostanzialmente legato a operazioni improprie quali danni delle strutture incapsulanti, abbandoni in ambiente, smaltimenti errati, oppure anche incidenti industriali durante le fasi di trattamento. Situazioni del genere possono provocare un rilascio di metalli e sostanze pericolose, con un impatto ambientale e sulla salute molto rilevante [7].

La legislazione vigente accomuna i pannelli fotovoltaici al RAEE, ovvero Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche, e ne prevede lo smaltimento attraverso procedure codificate. In particolare, i materiali di elevato valore dovrebbero essere raccolti e riutilizzati in modo da ridurre la richiesta delle materie prime, l’impatto ambientale derivante dal loro smaltimento in discarica, e di conseguenza la quantità di energia necessaria nel ciclo produttivo, con ovvi risparmi di emissioni. **Inoltre occorre tenere**

Tab. 1 Principali elementi contenuti nei pannelli fotovoltaici per tipologia (x-Si: pannelli al Silicio; CdTe: pannelli al tellururo di cadmio; CIGS/CIS: pannelli a rame, indio, gallio, selenio): % in peso dei materiali utilizzati e percentuale di riciclabilità. (-): assente. (n.d.): non determinato [6]

Materiale	x-Si (%)	CdTe (%)	CIGS/CIS (%)	Riciclabilità (%)
Alluminio (Al)	17,5	-	-	100
Rame (Cu)	1,0	0,03	n.d.	78
EVA	12,8	3,00	3,00	n.d.
Silicio (Si)	2,9	-	-	85
Vetro	65,8	96,80	96,80	97
Cadmio (Cd)	-	0,08	-	99
Stagno (Sn)	-	0,02	-	99
Tellurio (Te)	-	0,07	-	95
Gallio (Ga)	-	-	0,01	99
Indio (In)	-	-	0,01	75
Molibdeno (Mo)	-	-	0,12	99
Selenio (Se)	-	-	0,01	80
Zinco (Zn)	-	-	0,04	90

conto dell'aspetto economico: i pannelli sono prodotti con materiali di alto valore (ad esempio l'argento, il tellurio, il gallio, l'indio ecc.), il cui riciclo/riuso può portare a vantaggi rilevanti. Studi condotti dall'ENEA evidenziano che non è possibile definire con esattezza il contenuto di metalli o sostanze pericolose nei moduli fotovoltaici [3] [5] in quanto pannelli tecnologicamente simili, ma costruiti da differenti produttori, possono contenere differenti sostanze potenzialmente impattanti, a causa delle diverse tipologie di brevetti utilizzati [1]. In particolare, gli studi condotti nel Dipartimento Tecnologie Energetiche si focalizzano sulle tecniche di riciclaggio e sulla possibilità di sostituire alcuni componenti come ad esempio i polimeri fluorurati, comunemente utilizzati per lo strato isolante posteriore dei moduli, con altri materiali ecocompatibili, quali i bio-polimeri. In questo modo, il po-

tenziale impatto ambientale verrebbe ridotto pur garantendo l'affidabilità del modulo [5].

I processi cui sono sottoposti i pannelli fotovoltaici a fine vita sono numerosi [4]: fisico (frantumazione, flottazione, sabbatura ecc.), termico (combustione), chimico (dissoluzione mediante solventi) o di tipo fisico-chimico combinato. In molti casi un tipo di processo si alterna ad un altro, fino al recupero/trattamento completo dei pannelli. In molte fasi di trattamento è possibile individuare passaggi potenzialmente pericolosi per l'ambiente e la salute. In alcuni casi si tratta di processi che richiedono un utilizzo energetico molto elevato, che vanno quindi attentamente valutati in termini di LCA (Life Cycle Assessment).

Incremento dei rifiuti, impatti e costi

Alcuni autori [6] stimano un incre-

mento drammatico dei rifiuti provenienti da fotovoltaico da qui al 2050, a livello sia europeo che italiano (Tabella 2). Un tentativo di valutazione al 2050 del danno ambientale da lisciviazione di piombo derivante dai pannelli al silicio cristallino e di cadmio dai pannelli al tellururo di cadmio non correttamente riciclati/smaltiti a fine vita, indica un costo ambientale di circa 2 miliardi di euro per il piombo e di 14 milioni di euro per il cadmio [6]. Questo computo è relativo al solo aspetto legato alla salute umana e non tiene conto del possibile inquinamento atmosferico o delle falde acquifere.

Un discorso a parte va fatto in relazione alle emissioni di gas climalteranti derivanti dall'utilizzo dei pannelli fotovoltaici, dove l'unità di misura considerata è l'emissione di CO₂-eq/kWh misurata in grammi, prendendo in considerazione le fasi di estrazione e costruzione, installazione,

Tab. 2 Stima delle tonnellate di rifiuti da pannelli fotovoltaici in Europa e in Italia
Fonte: Malandrino et al., 2017

Anno	2013	2020	2030	2040	2050
Europa	11.395	33.000	133.000	4.000.000	9.500.000
Italia	1.757	1.000	5.000	1.000.000	n.d.

esercizio e fine vita. Questi sono aspetti fondamentali per la valutazione di LCA della tecnologia considerata. Dalla stima delle emissioni medie di gas climalteranti per i diversi tipi di pannello, si vede come quelli meno impattanti dal punto di vista delle emissioni climalteranti siano i

pannelli a tellururo di cadmio (con una media emissiva di 19,39 g CO₂-eq/kWh), seguiti dai pannelli a silicio amorfo (20,5 g CO₂-eq/kWh), dai pannelli CIGS (26,5 g CO₂-eq/kWh) e dai pannelli c-Si (34,5 g CO₂-eq/kWh). Ovviamente la valutazione delle emissioni climalteranti è in

funzione di una serie di fattori molto legati alle caratteristiche intrinseche degli impianti, e quindi queste indicazioni, che sono necessariamente generiche, debbono essere considerate esclusivamente come una indicazione di tendenza [6].

Per quel che riguarda la percen-

Potenziati rilasci nell'ambiente di sostanze nella fase di fine vita del fotovoltaico

Un recente studio ENEA [6] stima i potenziali rilasci negli anni degli elementi chimici contenuti nei pannelli a silicio cristallino (c-Si – Figura 1) e nei pannelli a film sottile (TF – Figura 2), nei due casi di un abbandono tal quale nell'ambiente e di uno smaltimento tal quale in discarica, calcolati sulla base delle stime di dismissione annue [2].

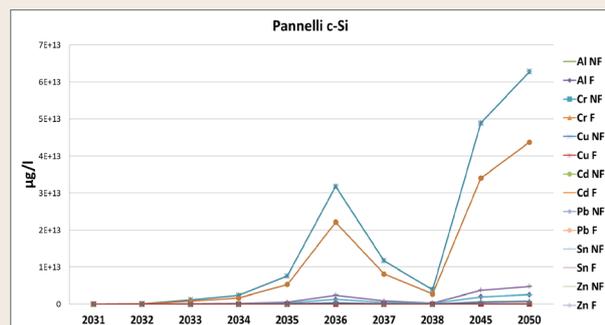


Fig. 1 Dati di dispersione in ambiente tramite lisciviazione (µg/L) dei singoli elementi chimici contenuti nei pannelli al silicio cristallino (c-Si). Proiezione al 2050. La flessione relativa agli anni 2037-2038 dipende dai dati riportati in letteratura [6]

Come si può vedere dalla Figura 1, per quanto riguarda i pannelli c-Si, il maggior pericolo di dispersione riguarda

il piombo, che supera abbondantemente in quantità tutti gli altri elementi, seguito dall'alluminio.

La Figura 2, relativa alla potenziale dispersione in ambiente tramite lisciviazione da pannelli a film sottile, mostra che i dati più alti di dispersione riguardano l'alluminio e il molibdeno, il manganese, il cadmio, lo zinco, il piombo, il selenio (e così via), per quantità sempre minori di sostanze potenzialmente liscivate. Diminuisce, in questo caso, la pericolosità relativa alla dispersione del piombo, mentre resta elevata quella relativa all'alluminio.

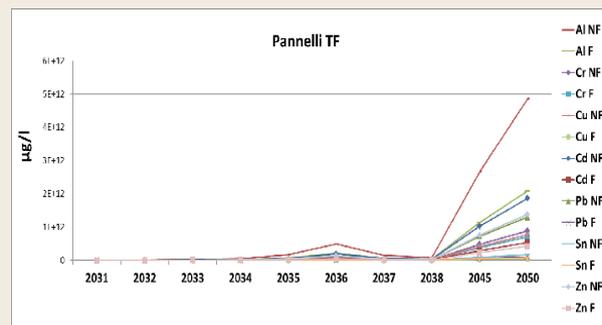


Fig. 2 Dati di dispersione in ambiente tramite lisciviazione (µg/L) dei singoli elementi chimici contenuti nei pannelli a film sottile (TF). Proiezione al 2050. La flessione relativa agli anni 2037-2038 dipende dai dati riportati in letteratura [6]

Il progetto RESIELP per il recupero dei materiali da pannelli fotovoltaici

Il progetto RESIELP (Recovery of Silicon and other materials from End-of-Life Photovoltaic Panels) nasce con l'obiettivo di recuperare materiali preziosi dai pannelli fotovoltaici. Finanziato con 2 milioni e mezzo di euro nell'ambito della KIC Raw Materials, la Knowledge Innovation Community sulle materie prime, ReSiELP vede la partecipazione per l'Italia dell'ENEA, dell'Università di Padova, delle aziende ITO e Relight e del CETMA (Centro di Ricerche Europeo di Technologie, Design e Materiali). Partecipano inoltre la società di consulenza austriaca Proko e le ungheresi Bay Zoltan (società non-profit per la ricerca) e la PMI Magyarmet; il coordinamento è della francese CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives).

Il progetto si sviluppa sull'arco di 36 mesi e prevede la realizzazione nello stabilimento milanese della Relight di un impianto prototipale zero waste per il recupero di materiali dei pannelli fotovoltaici a fine vita (silicio, argento, rame, vetro e alluminio), in linea con la direttiva europea

sui Rifiuti RAEE 2012/19/EU, recepita in Italia dal Decreto legislativo 49/2014 che impone il recupero dell'85% del peso del materiale (che corrisponde al peso del vetro e dell'alluminio nei pannelli in silicio cristallino)².

RESIELP mira anche al recupero e riciclo dei materiali contenuti nel restante 15% del peso, ovvero la parte costituita dalle celle che contiene i materiali più preziosi come silicio, argento e rame. Si tratta di obiettivi strategici nella prospettiva dell'approvvigionamento di risorse e materie prime ad elevato valore aggiunto, come quelle contenute negli elementi dei moduli fotovoltaici o in altri rifiuti elettronici, che rappresentano una nuova sfida ambientale, ma offrono anche rilevanti opportunità di business.

ENEA è coinvolta con numerosi laboratori per un approccio trasversale e integrato nella valutazione degli aspetti ambientali dei processi di recupero e supportare la progettazione dell'impianto per il trattamento termico dei pannelli e dei sistemi di trattamento dei reflui liquidi e gassosi³. Per approfondimenti il referente del progetto è marco.tammaro@enea.it



tuale di riciclabilità delle sostanze, differenti metodi di riciclaggio raggiungono risultati differenti. Vale la pena ricordare che alcuni elementi sono presenti in percentuali molto basse. L'opportunità del loro recupero a fine vita del pannello fotovoltaico dipenderà non solo dalla possibilità tecnica di realizzare l'azione, ma anche dal costo/beneficio del processo in termini economici.

In questo contesto si inserisce il Progetto RESIELP (REcovery of silicon and other materials from end of life Photovoltaic panels – vedi riquadro) che ha come obiettivo la realizzazione, in Italia, di un impianto pilota in grado di recuperare da pannelli fotovoltaici a fine vita non soltanto alluminio e vetro, ma anche materiali come silicio, argento e rame. Inoltre, il Laboratorio tecnologie per il riuso, il riciclo, il recupero e la valorizza-

zione di rifiuti e materiali detiene un brevetto (IT102017000033488, accettato 10-07-2019) per il recupero dei materiali dai pannelli a fine vita mediante un processo a basso impatto ambientale.

Nel caso in cui dalla valutazione del rapporto costi/benefici non emerga una convenienza economica nel recupero e riciclo del materiale fotovoltaico, è possibile che i materiali raccolti possano finire tal quali in discarica. Questo non è certamente il migliore scenario possibile, ma molto peggio sarebbe se gli impianti fotovoltaici fossero semplicemente “dimenticati” sui luoghi di installazione, in balia degli agenti atmosferici e delle rotture casuali, al fine di evitare i costi relativi a rimozione e smaltimento.

È quindi opportuno individuare le migliori procedure e tecnologie che permettano il trattamento e il recu-

pero a fine vita dei pannelli fotovoltaici in un modo sostenibile dal punto di vista ambientale ed economico. Non va persa l'occasione per tentare di ottimizzare queste procedure, ricordando che una tecnologia, per poter essere considerata realmente sostenibile, deve rispondere non solo a considerazioni di natura energetica, ma anche di economicità, sostenibilità ambientale e utilità sociale. Su questo fronte l'ENEA è impegnata con i suoi laboratori a livello di analisi, studio e sviluppo di tecnologie innovative.

Ringraziamenti

Si ringraziano i colleghi Marco Tammaro e Franco Roca per il supporto nella stesura di questo articolo.

- ¹ Il Decreto legislativo 49/2014 stabilisce che i pannelli fotovoltaici sono da considerarsi RAEE (Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche), soggetti quindi a trattamento per recuperarne fino all'85% in peso. La parte rimanente "potrebbe" andare in discarica. La ricerca condotta in ENEA per aumentare la % di riciclabilità dei moduli è stata già oggetto di reporting [4] e di un articolo pubblicato su questa rivista ove sono state presentate soprattutto le tecnologie per il riciclaggio dei moduli [5]. Qui si evidenziano soprattutto i rischi per l'ambiente legati ad un abbandono improprio
- ² L'obiettivo è di raggiungere un grado di maturità tecnologica TRL7 (Dimostrazione di un prototipo di sistema in ambiente operativo) al completamento del progetto, per arrivare poi a un TRL 9 entro tre anni dalla sua conclusione (Sistema reale provato in ambiente operativo - produzione competitiva, commercializzazioni)
- ³ Sono coinvolti i Laboratorio Tecnologie per il Riuso, il Riciclo, il Recupero e la valorizzazione di Rifiuti e Materiali; Tecnologie per l'uso e gestione efficiente di acqua e reflui; Valorizzazione delle risorse nei sistemi produttivi e territoriali BIOGEOC del Dipartimento sostenibilità dei sistemi produttivi e territoriali, Divisione Uso efficiente delle risorse e chiusura dei cicli e Divisione Protezione e valorizzazione del territorio e del capitale naturale

BIBLIOGRAFIA

1. IRENA and IEA-PVPS (2016), "End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels"- <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>
2. A. Paiano (2015), "Photovoltaic waste assessment in Italy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, pp. 99–112
3. M. Tammaro, A. Salluzzo, J. Rimauro, S. Schiavo, S. Manzo (2016), "Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels", *Journal of Hazardous Materials*, 306, pp. 395–405
4. V. Fiandra, L. Sannino, C. Andreozzi, F. Corcelli, G. Graditi (2019), "Silicon photovoltaic modules at end-of-life: Removal of polymeric layers and separation of materials", *Waste Management*, 87:97-107
5. M. Tammaro, G. Ansanelli, G. Fiorentino, A. Zucaro, M.L. Protopapa e L. Sannino (2019), "Soluzioni innovative per la chiusura del ciclo dei pannelli fotovoltaici", in *Energia Ambiente e Innovazione - Rivoluzione economia Circolare*". EAI n. 3 Settembre - Dicembre 2019, <https://doi.org/10.12910/EAI2019-054>
6. P. Carrabba, L.M. Padovani (2020), "I pannelli fotovoltaici a fine vita. Considerazioni sull'impatto ambientale e sulla salute dei processi di smaltimento/riciclo/riuso". RT/2020/7/ENEA. <https://iris.enea.it/handle/20.500.12079/54421>
7. D. Sica, O. Malandrino, S. Supino, M. Testa, M.C. Lucchetti (2018), "Management of end-of-life panels as a step towards a circular economy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp. 2934-2945
8. O. Malandrino, D. Sica, M. Testa, S. Supino (2017), "Policies and measures for sustainable management of solar panel end-of-life in Italy", *Sustainability*, 9, p. 481, <https://doi.org/10.3390/su9040481>