

Soluzioni innovative per la chiusura del ciclo dei pannelli fotovoltaici

Il corretto smaltimento dei rifiuti fotovoltaici è essenziale per evitare i rischi per salute e ambiente e non sprecare risorse preziose. L'IRENA stima che dai 78 milioni di tonnellate di pannelli che giungeranno a fine vita nel 2050 se ne potrebbero costruire oltre 2 miliardi di nuovi per un valore di 15 miliardi di dollari. ENEA è impegnata in progetti nazionali ed internazionali per la chiusura del ciclo dei pannelli fotovoltaici attraverso lo sviluppo di prodotti innovativi e di processi di trattamento sostenibili sotto il profilo economico ed ambientale e che favoriscano il massimo recupero dei materiali e la produzione di materiali a minor impatto

DOI 10.12910/EAI2019-054

di **Marco Tammaro**, **Giuliana Ansanelli**, **Gabriella Fiorentino** e **Amalia Zucaro**, Laboratorio Tecnologie per il Riuso, il Riciclo, il Recupero e la valorizzazione di Rifiuti e Materiali, **Maria Lucia Protopapa**, Laboratorio Materiali Funzionali e Tecnologie per Applicazioni Sostenibili - Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali - ENEA e **Lucio Sannino**, Laboratorio Sistemi ed Applicazioni Fotovoltaiche e Sensoristiche Dipartimento Tecnologie Energetiche - ENEA

Il nostro Paese è tra i maggiori installatori di pannelli fotovoltaici: nel 2015 l'Italia risultava al quinto posto nella classifica IRENA dei "Top Countries" e negli ultimi anni, il numero di impianti installati ha continuato a crescere, anche se ad un ritmo inferiore (Figura 1).

Sulla base dei dati del fotovoltaico installato in Italia (Figura 1) e, considerata una vita media dei pannelli di 20-25 anni, la gestione della dismissione degli impianti diventerà nei prossimi anni una sfida importante che dovrà essere affrontata in maniera adeguata (Figura 2).

Chiudere il ciclo di vita dei pannelli

Il previsto aumento dei rifiuti fotovoltaici è un tema di rilievo dal punto di vista ambientale ed anche

economico: tali rifiuti, infatti, se non smaltiti o trattati correttamente, possono rilasciare sostanze pericolose (Tammaro *et al.*, 2016) con impatti negativi sugli ecosi-

stemi e sulla salute umana. D'altro canto, i pannelli a fine vita possono essere valorizzati a fini economici. Il Rapporto "End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels"

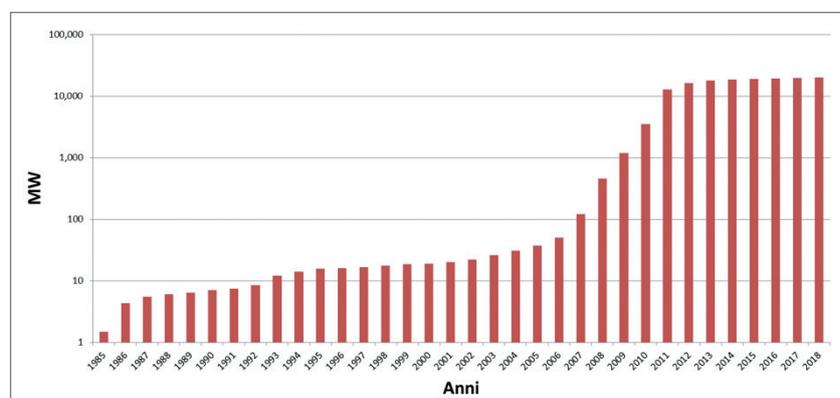


Fig. 1 Dati cumulativi su fotovoltaico installato in Italia fino al 2018
 Fonti: ENEA, GSE, Internet

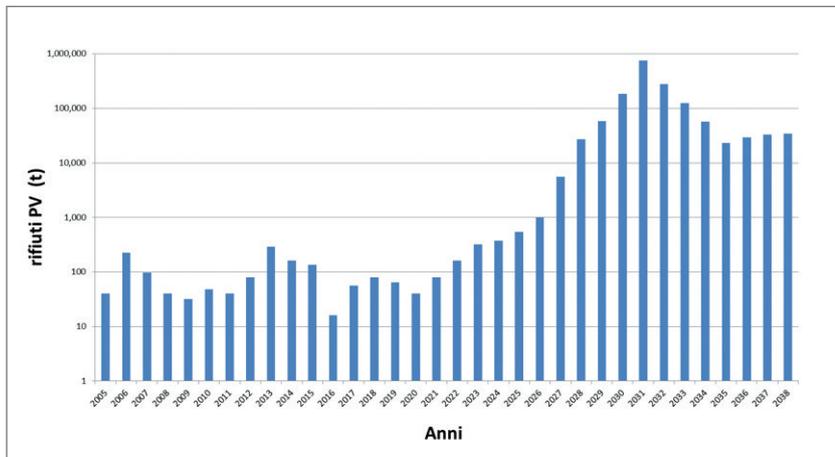


Fig. 2 Dati non cumulativi e previsione della produzione di rifiuti fotovoltaici in Italia, sulla base dell'installato e ipotizzando una vita media del pannello di 20 anni

(Irena, 2016), stima che, nel 2050, dai 78 milioni di tonnellate di pannelli fotovoltaici giunti a fine vita, si potrebbero ricavare materiali per costruire oltre 2 miliardi di nuovi pannelli con un giro di affari di 15 miliardi di dollari. Inoltre numerosi studi sulle ricadute ambientali ed economiche, relative a diverse modalità di recupero/riciclaggio dei pannelli (Global Data, 2012; Held, 2009; Müller et al., 2008; Sander *et al.*, 2007), hanno evidenziato che le soluzioni migliori sono quelle che prevedono anche il recupero dei costituenti minori (*riciclo ad alto valore*) che sono soprattutto da elementi rari e/o di valore oppure pericolosi per l'ambiente.

Il Decreto Legislativo n. 49/2014 che ha recepito la Direttiva UE 2012/19/UE definisce i pannelli RAEE (Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) soggetti a precisi obblighi di raggiungimento degli obiettivi di recupero (85% in peso) e riciclo (80% in peso). Pertanto, l'ottimizzazione del riciclaggio dei pannelli fotovoltaici costituisce un elemento imprescindibile per chiuderne il loro ciclo di vita, favorendo così la transizione verso un futuro sostenibile e secondo i dettami dell'economia circolare.

Le diverse tipologie di pannello fotovoltaico

Esistono diverse tipologie di pannelli fotovoltaici: tra le principali, si annoverano i pannelli in silicio (mono- e poli-) cristallino (c-Si), e a film sottile, che possono usare celle a base di silicio amorfo (a-Si) o di rame, indio e selenio (CIS) oppure di rame, indio, gallio e selenio (CIGS) o ancora di tellururo di cadmio (CdTe). Attualmente la tipologia più diffusa è rappresentata dai pannelli in c-Si che costituiscono circa il 90% del

parco fotovoltaico a livello mondiale (ITRPV, 2017). I moduli in c-Si sono costituiti da diversi strati sovrapposti (Figura 3), racchiusi in una cornice di alluminio:

- lastra di vetro temperato;
- foglio sigillante di Etilene Vinil Acetato (EVA);
- celle fotovoltaiche;
- secondo foglio sigillante in EVA;
- chiusura posteriore che può essere realizzata in vetro o in Tedlar (PVF/PVDF/PET).

I moduli fotovoltaici c-Si contengono vetro (73% circa) e alluminio (10% circa), oltre a piccole quantità di rame, argento e, ovviamente, silicio, che possono essere recuperati e riutilizzati, sia per realizzare nuovi moduli fotovoltaici sia in altri processi.

Occorre precisare che quando si parla di pannelli fotovoltaici c-Si non ci si riferisce ad un prodotto standard con una composizione fissa, bensì variabile, entro certi limiti, in base al costruttore e al progredire della tecnologia verso soluzioni più performanti.

ENEA è impegnata in progetti, nazionali ed internazionali, oltre che in collaborazioni con realtà industriali, per migliorare la sostenibilità del settore dei pannelli fotovoltaici. In particolare, ENEA contribuisce alla chiusura del ciclo

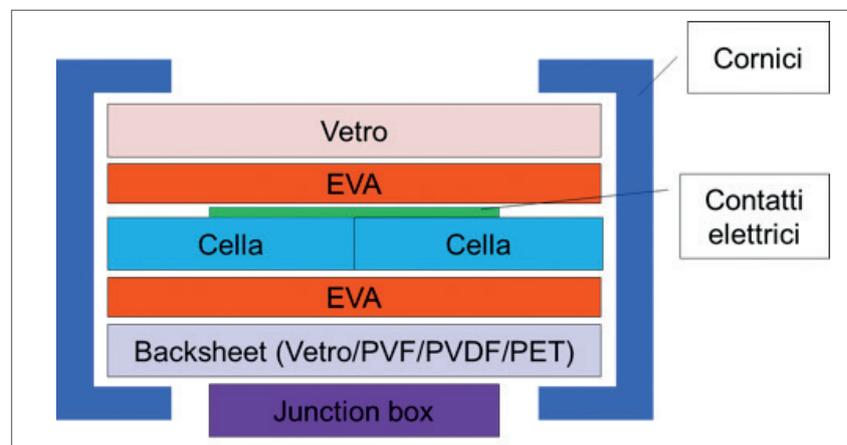


Fig. 3 Struttura a strati dei pannelli in silicio cristallino

dei pannelli fotovoltaici, attraverso lo sviluppo di prodotti e di processi di trattamento che favoriscano il massimo recupero dei materiali e che siano sostenibili, sotto il profilo economico ed ambientale. La complessità del prodotto “pannello fotovoltaico”, come detto, richiede, per poter essere affrontato in maniera adeguata, un approccio integrato attraverso diverse competenze, che ENEA è in grado di mettere in campo. Infatti il ciclo del pannello visto nel suo insieme costituito dalle sue principale fasi di “realizzazione” e del “fine vita”, presenta diverse criticità.

La riduzione dell'impatto ambientale del fotovoltaico passa necessariamente attraverso una progettazione innovativa di moduli ed impianti che garantisca contemporaneamente efficienza tecnologica e sostenibilità economica ed ambientale nell'intero ciclo di vita. L'obiettivo è eliminare o ridurre l'utilizzo di sostanze fortemente impattanti sull'ambiente quali: cadmio nei pannelli a film sottile; alcuni ftalati usati nei plasticizzanti; composti bromurati usati come ritardanti di fiamma; piombo usato nelle

paste di metallizzazione; composti fluorurati derivanti dai polimeri usati come backsheet nei pannelli a base di silicio.

In quest'ambito, ENEA, tramite il Dipartimento Tecnologie Energetiche, è impegnata in attività riguardanti la possibilità di sostituire i polimeri fluorurati che compongono i backsheet più comunemente usati nella fabbricazione dei moduli a base di silicio, con bio-polimeri aventi proprietà fisiche confrontabili. Un backsheet è un film isolante, usato nei pannelli allo scopo di proteggerne i componenti da elementi ambientali che possono ridurre il loro tempo di vita. La sfida è affrontare la loro realizzazione con materiali rinnovabili a base vegetale, che rendano i pannelli più eco-sostenibili e tecnologicamente avanzati. Avendo alta conducibilità termica, i bio-backsheet possono aumentare la potenza dei pannelli trasferendo rapidamente il calore lontano dalle celle solari, il che abbassa la temperatura operativa e migliora l'efficienza di conversione solare e la potenza erogata. Inoltre, i backsheet convenzionali sono realizzati laminando più strati di materiali

differenti per offrire funzionalità combinate, i quali però spesso sono soggetti a delaminazione, riducendo la vita del pannello. L'utilizzo di un bio-backsheet mono-strato consente di eliminare il problema della delaminazione. Un altro importante vantaggio dell'uso di bio-polimeri è la significativa riduzione dell'impatto ambientale associato ai convenzionali processi di recupero dei materiali riciclabili, effettuati su pannelli contenenti polimeri fluorurati.

Gestione del fine vita

Nella fase “fine vita”, il pannello rappresenta un rifiuto particolare, in quanto progettato e costruito per essere resistente alle intemperie e per durare nel tempo, quindi presenta problematiche non banali per il suo trattamento finalizzato a disassemblaggio e recupero dei materiali. **In tal senso ENEA, tramite il Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali, è impegnata nel progetto RESIELP che prevede la realizzazione di un impianto prototipale, in Italia, per il trattamento dei pannelli in silicio cristallino a fine vita.** Tale impianto

Tecnica	Applicazione
SEM-EDS	Analisi di tipo chimico-composizionale e morfologico e consente di individuare gli elementi chimici presenti nei materiali
Spettroscopia ottica	Permette di riconoscere i legami chimici presenti nei campioni, studiandone le vibrazioni, e consente quindi ad esempio il riconoscimento delle molecole presenti nei materiali
Analisi termogravimetrica (TGA)	Utilizzata per individuare l'intervallo di temperatura in cui effettuare il trattamento termico del campione per eliminare la parte organica
Analisi termica differenziale (DSC)	Misura effetti termici e in particolare calorimetrici associati a trasformazioni chimiche e fisiche che si verificano su un campione quando questo è sottoposto ad un programma di temperatura controllato (sia in riscaldamento che in raffreddamento). Essendo i parametri investigati dalla tecnica DSC specifici di ciascun materiale (temperatura di fusione, cristallizzazione, transizioni di fase, ecc.), la tecnica consente l'identificazione dei materiali costituenti la cella fotovoltaica
TGA/DSC-EGA	Analizzare delle specie volatili che evolvono durante il processo termico

Tab. 1 Tecniche analitiche utilizzate per ottenere informazioni sui materiali costituenti la cella fotovoltaica per impostare il successivo trattamento di recupero dei componenti

è finalizzato al recupero dei principali componenti, quali vetro ed alluminio, nonché dei metalli che sono contenuti nelle celle, ovvero rame, argento e silicio. Tale impianto utilizza diversi trattamenti, quali termico, fisico e idrometallurgico, e l'ENEA ha fornito supporto sia nella progettazione dell'impianto sia nella valutazione dell'impatto ambientale dovuti alle emissioni solide, liquide e gassose del processo, in una prospettiva di Life Cycle Thinking, gli aspetti ambientali (LCA) ed economici (LCC) del processo di recupero, per garantirne la sostenibilità.

I sistemi di trattamento dei pannelli a fine vita sono diversi e tutti presentano vantaggi e svantaggi, sia economici che ambientali. È necessario individuare un processo che minimizzi gli impatti ambientali ma che allo stesso tempo sia economicamente sostenibile. A

tal riguardo ENEA ha sviluppato un brevetto (Tammaro e Migliaccio, n. 102017000033488) italiano sul trattamento dei pannelli in silicio cristallino a fine vita. Il processo brevettato, finalizzato al recupero dei componenti principali del pannello, consiste in un trattamento termico a basso impatto ambientale. Al fine di ottimizzare i parametri del processo utilizzato per il recupero del silicio, risulta di estrema utilità conoscere i materiali costituenti la cella fotovoltaica, monitorare il processo di trattamento ed infine valutare la qualità dei materiali recuperati. Questo aspetto è particolarmente rilevante nel caso dei pannelli in quanto, come detto, essi rappresentano un prodotto molto variegato con problematiche diverse quando si presenta il momento del trattamento. È fondamentale applicare un confronto intertecnico per avere il quadro più completo possi-

bile delle informazioni necessarie per impostare il successivo trattamento di recupero materiali. Tra le tecniche analitiche idonee a tale scopo e presenti nei laboratori ENEA vi sono la microscopia elettronica a scansione con microanalisi a dispersione di energia (SEM-EDS), la spettroscopia ottica vibrazionale (Raman e FTIR) e le tecniche di analisi termica. Esempi di applicazioni sono brevemente riportati in Tabella 1.

Conclusioni

La problematica riguardante la chiusura del ciclo dei pannelli fotovoltaici risulta estremamente complessa sotto il profilo tecnologico ed ambientale. Pertanto, per una gestione efficace del ciclo di vita, è richiesto un approccio integrato che metta a sistema competenze multidisciplinari come quelle messe in campo da ENEA.

BIBLIOGRAFIA

1. Global Data (2012), "Solar Module Recycling - a Necessary Step to Maximise Environmental Benefits of Solar PV Industry"
2. Held, M. (2009), "Life Cycle Assessment of CdTe Module Recycling," Proceedings 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg
3. IRENA (International Renewable Energy Agency) and IEA-PVPS (June 2016). End of life management – Solar Photovoltaic Panels
4. ITRPV. International Technology Roadmap for Photovoltaic Results 2016, 8th ed. 2017
5. Müller, A., S. Schlenker and K. Wambach (2008), "Recycling of Silicon, Environmental Footprints and Economics," *Proceedings for the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2008*, Valencia, Spain
6. Sander, K., et al. (2007), *Study on the Development of a Takeback and Recovery System for Photovoltaic Modules*, European Photovoltaic Industry Association, German Solar Industries Association, Berlin
7. Tammaro M. (ENEA) e Migliaccio P. (ex Betasystem), Nuovo processo a basso consumo energetico e a basso impatto ambientale per il recupero dei componenti principali dei pannelli fotovoltaici in silicio cristallino a fine vita, Brevetto N. 102017000033488, MISEA00_PIT.REGISTRO UFFICIALE U.O.0180568, (2019)
8. Tammaro M., Salluzzo A., Rimauro J., Schiavo S., Manzo S. (2016). "Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels". *Journal of Hazardous Materials*, 306 pp. 395–405