



## Impatto ambientale dei rifiuti fotovoltaici

Il solare fotovoltaico continua a prosperare in Europa e nel mondo. Tuttavia, non va trascurato un problema che si associa sempre più ai pannelli fotovoltaici: la gestione dei rifiuti che ne derivano.

Il Centro Ricerche ENEA di Portici è impegnato in attività sperimentali aventi lo scopo di valutare l'impatto ambientale dei pannelli nella fase di *end life*

DOI: 10.12910/EAI2014-58

■ Marco Tammaro, Antonio Salluzzo, Sonia Manzo, Carlo Privato

**L**e prime anticipazioni del V rapporto dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), che sarà ufficializzato a fine 2014, non lasciano spazio a dubbi: le conseguenze del riscaldamento globale si stanno già manifestando e, senza invertire la tendenza, le conseguenze sarebbero presto molto pesanti anche in Europa, nel Mediterraneo e in Italia in particolare. Alluvioni lampo, desertificazione e conseguente riduzione delle produzioni agricole, distruggerebbero l'economia delle regioni meridionali con un costo sociale devastante.

La direzione da prendere passa sicuramente attraverso la riduzione dei consumi e la diffusione delle fonti energetiche rinnovabili. Si può, quindi, facilmente prevedere che il solare fotovoltaico (PV), la tecnologia di più recente maturazione, continuerà a prosperare in Europa e nel mondo.

Tuttavia, non va trascurato un problema che si associa sempre più

al PV, soprattutto in Europa data la notevole crescita registrata (80 GW installati alla fine del 2013 di cui oltre 10 GW, pari ad almeno 50 milioni di moduli, solo nell'ultimo anno): la gestione dei rifiuti che ne derivano. I moduli PV generano energia elettrica sfruttando la fonte solare e per questo sono da sempre considerati *eco-friendly*, tuttavia, negli ultimi anni l'impatto ambientale dei cicli di vita dei pannelli fotovoltaici ha attirato l'attenzione del mondo scientifico [1, 2, 3, 4, 5]. La vita di un pannello fotovoltaico può essere suddivisa in tre fasi: costruzione, produzione energetica e fine vita (*end life*).

La fase di *costruzione* è sicuramente critica dal punto di vista ambientale perché prevede l'utilizzo di diversi materiali e sostanze, liquide, solide e gassose [6, 7], che presentano elevati rischi per la salute umana, come mostrato nella Tabella 1.

Quelli indicati in tabella sono rischi che, almeno nei paesi occi-

dentali, sono normalmente gestiti attraverso adeguate misure di prevenzione e protezione. Comunque è importante riportarli per sottolineare il livello di attenzione che si deve dedicare alla problematica.

La seconda fase, la produzione energetica, può dar luogo ad emissioni di sostanze inquinanti a causa di eventi accidentali, come incendi e/o distruzione [8], oltre a causare depauperamento delle terre agricole o da allevamento. Inoltre non è secondario l'impatto visivo ed architettonico in un paese come l'Italia, ricco di tesori d'arte e paesaggi naturali.

La fase *end life* sta assumendo un'importanza crescente dovuta alla previsione di aumento di rifiuti fotovoltaici [9], a cui si lega anche la possibilità di riciclare i materiali [10, 11], come conseguenza diretta dell'aumento di installazioni

■ Marco Tammaro, Antonio Salluzzo, Sonia Manzo, Carlo Privato  
ENEA, Unità Tecnica Tecnologie Portici

Materiali	Fase di processo in cui è usato	Pericolosità ed effetti sulla salute umana
Gallio Arenseno	Chemical Vapour Deposition (CVD) (celle a concentrazione)	Cancerogeno. Sangue, reni, polmoni
Cadmio	CdTe e CdS deposizione CdCl <sub>2</sub> trattamento	Cancerogeno. Reni
Cloro-silano	a-Si e c-Si deposizione	Irritante
Diborano Germano Fosfina	a-Si dopaggio, deposizione	Sistema Nervoso Centrale Sistema Gastrointestinale Reni, sangue, polmoni
Ossicloruro di fosforo	c-Si dopaggio	Irritante. Reni
Idrogeno silano	a-Si deposizione	Irritante, infiammabile.
Fluoruro di idrogeno Tetracloruro di carbonio	Etching	Irritante, cancerogeno, gas serra. Ossa, denti, fegato
Seleniuro di idrogeno Idrogeno solforato	CIS trattamento	Irritante, infiammabile. Sistema Nervoso Centrale Sistema Gastrointestinale
Indio Tellurio Selenio Rame	CIS deposizione	Irritante. Fegato, polmoni, ossa Sistema Nervoso Centrale Sistema Gastrointestinale
Piombo Stagno Molibdeno Argento	Contattatura	Sistema Nervoso Centrale Sistema Gastrointestinale Sangue, organi riproduttivi, reni
Acido nitrico Idrossido di sodio	Lavaggio wafer	Irritante, corrosivo

**TABELLA 1** Materiali e sostanze usate nella fabbricazione dei pannelli fotovoltaici e suoi effetti sulla salute umana  
Fonte: elaborazione ENEA su dati di Fthenakis [1]

[12, 13]. Il caso del rifiuto fotovoltaico è unico perché il tempo che intercorre tra la fabbricazione del prodotto e lo smaltimento del rifiuto è molto lungo, di solito 25-30 anni [14]. Questa peculiarità rappresenta una criticità non secondaria nella problematica di gestione del rifiuto. Infine concorrono a formare la massa di rifiuto anche i pannelli rotti durante le fasi d'installazione (stimati intorno al 2%) e gli scarti di produzione (stimati intorno al 1-2%).

### Principali elementi tossici contenuti nei moduli

Ci sono vari tipi di celle fotovoltaiche che differiscono sostanzialmente per i materiali semiconduttori utilizzati e per le tecnologie di produzione. Si è soliti fare una distinzione tra la tecnologia a silicio cristallino e quella a film sottile. Per il primo, il semiconduttore utilizzato è il silicio cristallino (c-Si), di cui ci sono due tipi principali utilizzati per le celle fotovoltaiche:

- monocristallino: fette spesse ~200

µm derivate da un lingotto monocristallo; elevato grado di purezza del materiale;

- policristallino: fette spesse ~200 µm derivate da un lingotto a struttura cristallina con più grani a differente orientazione; grado di purezza inferiore.

Nelle celle a film sottile il materiale semiconduttore, spesso qualche micron, è generalmente deposto su un substrato di vetro. I tipi principali possono essere suddivisi come segue:

Tecnologia Fotovoltaica	Metalli
Silicio cristallino	Stagno, Piombo, Rame, Boro, Fosforo, Titanio, Argento, Alluminio
Silicio amorfo e microcristallino	Stagno, Piombo, Indio, Germanio, Zinco, Boro, Fosforo, Rame, Argento, Alluminio, Cromo
CdTe	Cadmio, Tellurio, Stagno, Indio, Rame, Piombo, Zolfo, Piombo, Argento
CIGS	Molibdeno, Rame, Indio, Gallio, Selenio, Cadmio, Zinco, Boro, Piombo, Argento, Alluminio

**TABELLA 2** Elementi pericolosi presenti nei moduli fotovoltaici delle diverse tecnologie

Fonte: elaborazione ENEA su dati da varie fonti

- silicio amorfo (a-Si): gli atomi di silicio usati come semiconduttore sono inseriti in un reticolo disordinato, come in un liquido, pur mantenendo le caratteristiche dei solidi;
- CIS/CIGS: il materiale semiconduttore è un composto policristallino, composto da rame, indio, selenio per il CIS e da rame, indio, gallio e selenio per il CIGS;
- CdTe: il semiconduttore è un composto policristallino di tellurio di cadmio.

I materiali e i processi utilizzati nella fabbricazione dei moduli fotovoltaici determinano la presenza in essi, anche se sempre in quantità modeste, di diversi elementi classificati come pericolosi. La preoccupazione principale riguarda la presenza di cadmio nei moduli a film sottile [6, 15], e di piombo e cromo nei moduli in c-Si [2, 16].

A fine vita, senza una gestione adeguata dei pannelli, questi metalli potrebbero essere dispersi nell'ambiente. In caso di deposito in discarica senza altre precauzioni o peggio se abbandonati nell'ambiente, potrebbero verificarsi rotture meccaniche dei pannelli con perdita della sigillatura e conseguente pe-

netrazione di acqua e aria. Questo determinerebbe un deterioramento dei componenti e quindi un possibile rilascio di elementi pericolosi nell'ambiente circostante, con effetti potenzialmente molto dannosi sulla salute umana. Nella seguente tabella sono elencati gli elementi potenzialmente dannosi presenti nei moduli delle diverse tecnologie.

### Normativa di riferimento

La Commissione europea, con la Direttiva n.2008/98/CE del 19 novembre 2008 (Gazzetta Ufficiale Europea del 22 novembre 2008) definisce rifiuto "(...) qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o l'obbligo di disfarsi". Il D.M. 205 del 2010, che integra e modifica il DLgs 152/2006, esattamente all'art. 183 introduce una nuova definizione di rifiuto pe-

ricoloso: "Rifiuto che presenta una o più caratteristiche di cui all'Al. I della parte quarta del presente decreto". L'allegato I presenta un elenco di caratteristiche di pericolo, identificati dalla lettera H seguita da un numero. In particolare la caratteristica H14, "Ecotossico" recita: "Rifiuti che presentano o possono presentare rischi immediati o differiti per uno o più comparti ambientali".

Il 24 luglio 2012 è stata pubblicata, sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, la Direttiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 4 luglio 2012 sui Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE). Questa sostituisce la Direttiva 2002/96/CE ed include anche i moduli fotovoltaici nell'elenco degli AEE (Categoria 4). La suddetta direttiva, in linea con la politica comunitaria delle ultime decenni sul trattamento dei rifiuti,

Periodo	Riciclaggio (%)	Recupero (%)
Dal 13/08/2012 al 14/08/2015	65	75
Dal 15/08/2015 al 14/08/2018	70	80
Dal 15/08/2018	80	85

**TABELLA 3** Percentuali di riciclaggio e recupero fissati dalla Direttiva 2012/19/UE

Fonte: Direttiva 2012/19/UE



privilegia il recupero ed il riciclaggio dei materiali che compongono i moduli, rispetto al conferimento in discarica. Nella seguente tabella sono illustrati gli obiettivi fissati dalla Direttiva.

Il Decreto "Attuazione della Direttiva 2012/19/UE sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE)", di recepimento da parte dell'Italia della suddetta Direttiva, è datato 14 marzo 2014 ed è entrato in vigore il 12 aprile 2014. Indicazioni sul recupero dei pannelli fotovoltaici erano contenute anche nel D.M. del 5 maggio 2011 (il cosiddetto "quarto conto energia") che all'art. 11 indica, tra gli obblighi del soggetto responsabile per gli impianti entrati in funzione dopo il 30 giugno 2012, anche di trasmettere al GSE il "certificato rilasciato dal produttore dei moduli fotovoltaici, attestante l'adesione dello stesso a un sistema o consorzio europeo che garantisca, a cura del medesimo produttore, il riciclo dei moduli fotovoltaici utilizzati al termine della vita utile dei moduli". Questa disposizione è stata rafforzata con il D.M. del 5 luglio 2012 (il "quinto conto energia") che all'art. 7 stabilisce, tra l'altro, come "i moduli fotovoltaici devono essere prodotti da un produttore che aderisce a un sistema o consorzio europeo che garantisca il riciclo dei moduli fotovoltaici utilizzati al termine della vita utile dei moduli; l'attestazione è rilasciata dal sistema o consorzio di riciclo; per i moduli importati, l'adesione può essere effettuata dall'importatore; il GSE definisce, nell'ambito delle regole applicative di cui all'articolo 10,

*comma 5, i requisiti da richiedere ai sistemi o consorzi ai fini del rilascio dell'attestazione".*

### Quadro generale della potenza fotovoltaica installata in Italia

L'evoluzione dell'industria e della potenza fotovoltaica installata in Italia è stata dettata dai diversi interventi legislativi volti a favorirne la diffusione e che si sono succeduti a partire dai primi anni 80. I principali *milestone* di questa storia sono i seguenti:

- Legge 308 del 29/5/82 per l'elettificazione rurale.
- Anni 90 - Impianti dimostrativi finanziati con diversi strumenti tra cui il Programma Valoren e il Programma THERMIE.
- Programmi nazionali e regionali "Tetti Fotovoltaici", Decreto 16/3/2001 del Ministero dell'Ambiente (Incentivazione in conto capitale) e segg.
- DLgs n.387 del 29/12/2003, Attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili.
- Decreti attuativi del 28/7/2005 e del 6/2/2006, 1° Conto Energia.
- Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 19/2/2007, 2° Conto Energia.
- Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 6/8/2010, 3° Conto Energia.
- Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 5/5/2011, 4° Conto Energia.
- Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 5/7/2012, 5° Conto Energia.

In realtà, come si può vedere dalla Figura 1, si può parlare di una vera e propria diffusione del fotovoltaico solo con l'introduzione anche in Italia del concetto di incentivazione in conto energia, analogamente a quanto avvenuto in altri Paesi in precedenza (Germania). Il pagamento, per un periodo molto lungo (20 anni), di una tariffa ritenuta remunerativa e fissa nel tempo per ogni kWh prodotto e immesso in rete dagli impianti *grid connected* ha favorito la nascita di piccoli e grandi nuovi produttori di energia distribuiti su tutto il territorio nazionale. I programmi incentivanti hanno in parte consentito anche lo sviluppo di un'industria italiana di moduli fotovoltaici che ha avuto il suo picco produttivo nel 2011; poi il crollo dei prezzi dovuto al crescente divario tra offerta e domanda sul piano internazionale ha messo in crisi queste giovani aziende, molte delle quali hanno dichiarato bancarotta, o sospeso la produzione.

### Previsioni su quantità di rifiuti prodotti da pannelli a fine vita

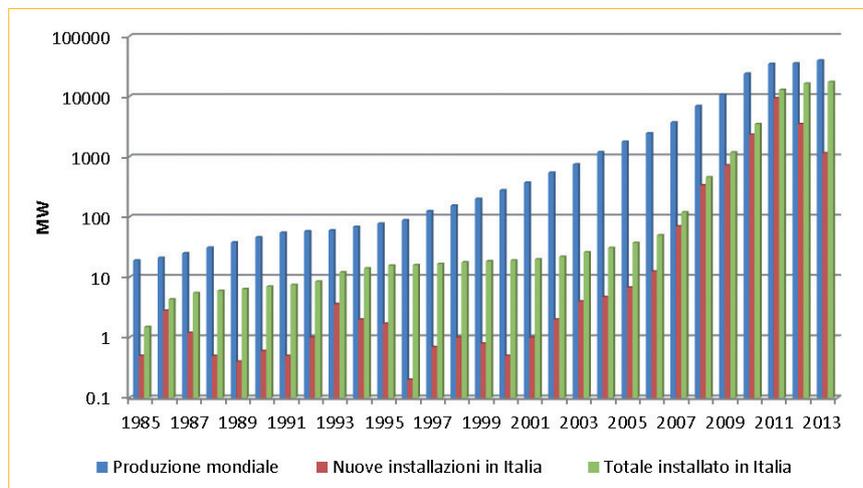
La generazione di rifiuti derivanti dai pannelli fotovoltaici a fine vita presenta una correlazione diretta con la crescita del mercato fotovoltaico. Tuttavia quantificare con esattezza l'entità dei rifiuti prodotti è difficoltoso a causa di diversi elementi di incertezza.

Trascurando gli scarti dovuti a difetti di fabbricazione, guasti o danneggiamenti, i principali fattori che influenzano le quantità di rifiuti generati nel tempo e su cui si basano in genere le previsioni, sono:

- entità delle installazioni annuali;
- peso per  $MW_p$ ;
- durata della vita utile.

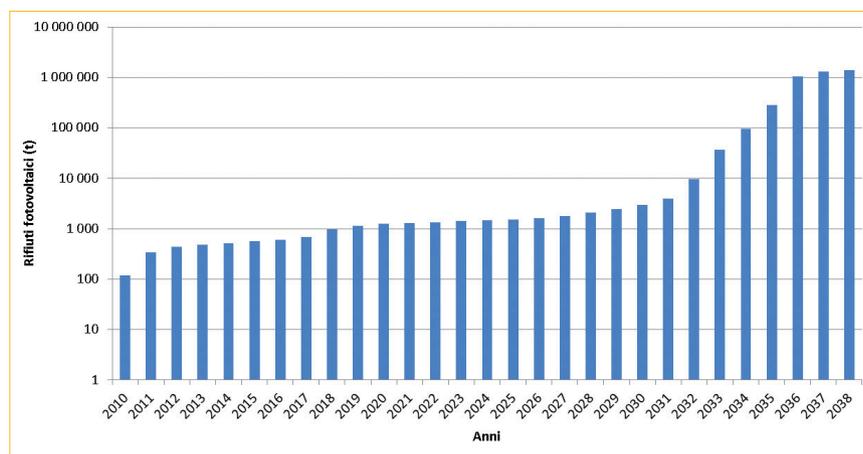
La vita utile dei moduli è teoricamente infinita in quanto non vi sono parti meccaniche in movimento, però, a causa del naturale degrado dei materiali, dopo 25-30 anni le loro prestazioni diventano molto basse. Le principali cause di tale diminuzione delle performance sono da ricercarsi nella penetrazione di umidità, nella delaminazione dell'incapsulante e nell'ossidazione dei contatti elettrici. La letteratura di settore riporta stime che fissano una produzione di rifiuto di circa 70-80 t per ogni  $MW_p$  installato. Partendo da questa equivalenza ed ipotizzando una durata massima di funzionamento di 25 anni, dai dati sull'installato in Italia (Figura 1), si possono ottenere le previsioni di quantità di rifiuto generato nei prossimi anni. Nella Figura 2 sono riportati i dati, fissando una produzione di 80 t di rifiuto per ogni  $MW_p$  installato.

Come si vede dalla Figura 2, l'anno 2030 è quello in cui dovrebbe avvenire la variazione della pendenza della curva di crescita dei rifiuti. Questo è in linea con le previsioni su scala mondiale [9], che prevedono un incremento rilevante proprio dopo il 2030. Nella Figura 3 è riportata una previsione, effettuata nel 2011, di rifiuti fotovoltaici prodotti in Europa suddivisi per tecnologia [17]. Per CPV s'intende il fotovoltaico a concentrazione, mentre le tecnologie emergenti comprendono le cosiddette celle solari fotosintetiche, le celle organiche ed infine quelle ibride.



**FIGURA 1** Quadro della potenza fotovoltaica installata in Italia dal 1985 al 2013, confrontato con la produzione mondiale

Fonte: ENEA, IEA, PVNews, Solar Energy Report



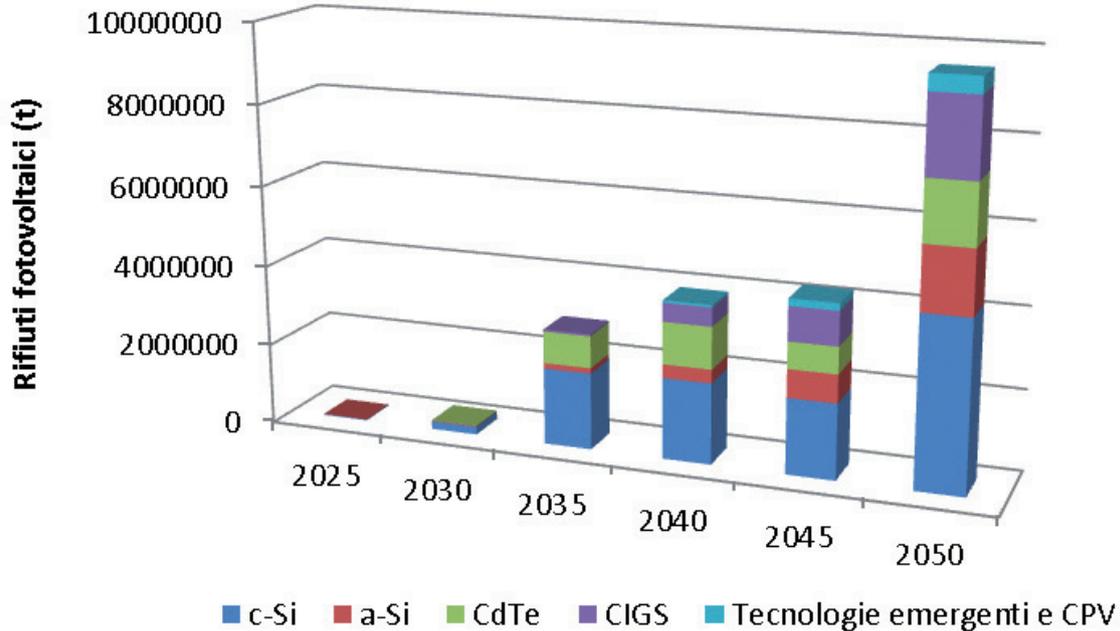
**FIGURA 2** Previsioni sui rifiuti fotovoltaici prodotti in Italia a partire dai dati sulla potenza installata

Fonte: elaborazione ENEA su dati IEA, PVNews, Solar Energy Report

### Attività sperimentali su impatto ambientale dei pannelli a fine vita

Da alcuni anni, il Centro Ricerche ENEA di Portici è impegnato in attività sperimentali con lo scopo di valutare l'impatto ambientale dei pannelli fotovoltaici durante la fase

di *end life* [18, 19, 20, 21, 22]. In tale ambito, uno studio, finanziato dal Consorzio COBAT, ha permesso di valutare il rilascio di metalli nell'ambiente da parte di pannelli danneggiati e di verificarne l'effetto ecotossicologico. Allo scopo di esaminare un campione significa-



**FIGURA 3** Previsione sui rifiuti fotovoltaici prodotti in Europa e suddivisi per tipologia  
 Fonte: Rapporto finale progetto europeo [17]

tivo dei moduli installati in Italia, sono stati utilizzati 48 pannelli, di produzione sia italiana che estera, raggruppati in 34 tipologie che si distinguono l'una dall'altra in base ad una delle seguenti caratteristiche: produttore, tecnologia, dimensioni cella fotovoltaica, provenienza materiali, anno di produzione. Le suddette tipologie sono state poi divise in due gruppi, in base alla tecnologia costruttiva: tecnologia cristallina (36 pannelli corrispondenti a 26 tipologie diverse) e film sottile (12 pannelli corrispondenti a 8 tipologie diverse). I moduli in silicio cristallino sono stati

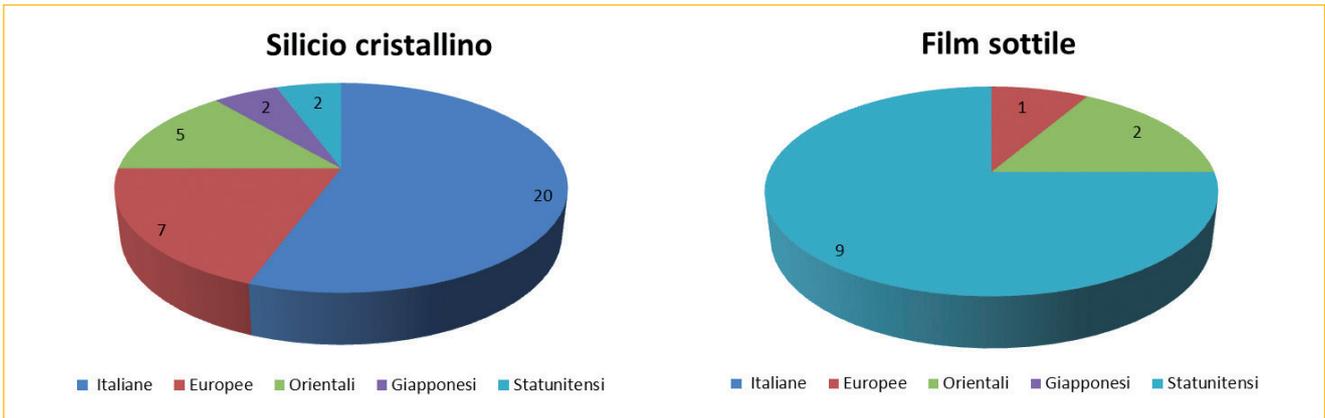
suddivisi in 4 sottogruppi in base all'arco temporale di produzione (1985-1986, 1992-1997, 2005-2010 e 2011-2012). Il gruppo dei moduli a film sottile è stato prodotto nell'arco temporale che va dal 1993 al 2011. Non ci sono moduli degli anni ottanta in quanto la produzione con la tecnologia a film sottile di quel periodo non è stata rilevante. Nell'individuazione della campionatura si è tenuto conto di alcune considerazioni:

- la percentuale delle installazioni con tecnologie a film sottile in Italia (6%) è sempre molto inferiore a quella corrispondente

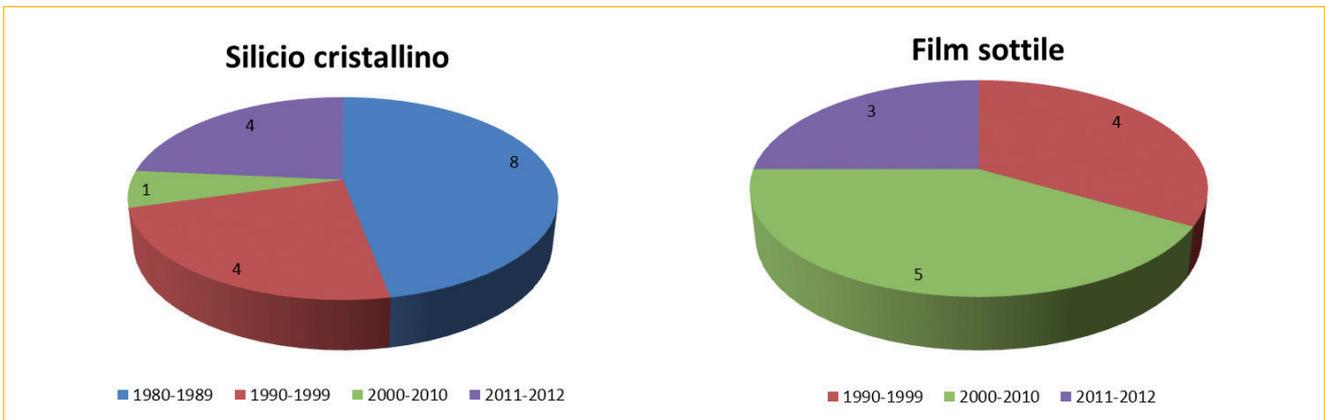
alla produzione mondiale;

- anche se una buona parte della produzione nazionale degli ultimi anni è stata utilizzata per installazioni in Italia, essa non può coprire che una quota inferiore al 10% del totale installato;
- la quota restante è stata realizzata con moduli europei per una quota tra il 30 e il 40%, e per il resto con moduli prevalentemente cinesi e in parte giapponesi.

Di seguito sono riportate due figure in cui i pannelli usati per lo studio sperimentale di impatto ambientale sono raggruppati, in numero, oltre che per tecnologia, anche per



**FIGURA 4** Distribuzione dei pannelli in base alla tecnologia e provenienza geografica  
 Fonte: elaborazione e dati ENEA



**FIGURA 5** Distribuzione dei pannelli in base alla tecnologia ed anno di fabbricazione  
 Fonte: elaborazione e dati ENEA

provenienza geografica (Figura 4) e per anno di fabbricazione (Figura 5). Infine il Centro Ricerche ENEA di Portici partecipa, con un ruolo di primo piano, al progetto “Dispositivi, tecniche e tecnologie abilitanti per le Fonti Energetiche Rinnovabili verso la Green Economy” (FERGE), che si colloca nell’ambito del Distretto Alta Tecnologia (DAT) “Smart Power System” della Regione Campania (finanziamento MIUR). Nell’ambito

del progetto è prevista una linea di ricerca “Riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita e recupero sostenibile delle materie prime”, che si propone di contribuire a sviluppare modalità di integrazione dei sistemi produttivi e distributivi con processi di raccolta, trattamento e recupero dei moduli fotovoltaici a fine vita e dei materiali/componenti in esso contenuti. In particolare le attività di ricerca e sviluppo prevedono anche test sperimentali

tali in laboratorio ed analisi LCA, come strumenti per la valutazione dell’impatto ambientale.

### Conclusioni

I risultati dello studio sperimentale sul rilascio di metalli e i loro effetti sugli organismi viventi sembrano confermare i motivi di attenzione sulla problematica esposta. Infatti sono stati riscontrati casi di rilasci non trascurabili di metalli pesanti

ti da moduli c-Si, soprattutto per quelli costruiti negli anni ottanta, e quindi già nella fase di *end life*. Nel caso di pannelli di più recente fabbricazione, sono stati i moduli a film sottile contenenti cadmio o selenio a dimostrarsi più impattanti. Le prove ecotossicologiche sui lisciviati risultanti dai test di rilascio hanno

dimostrato in molti casi la potenziale pericolosità dei campioni. È stata inoltre evidenziata la necessità di effettuare ulteriori approfondimenti per definire la procedura più idonea per la classificazione dei moduli fotovoltaici in funzione della ecotossicità osservata. In conclusione, le attività di ricerca del Centro

Ricerche ENEA di Portici hanno dimostrato la potenziale pericolosità di una gestione incontrollata del rifiuto fotovoltaico e la lungimiranza dell'inserimento dei moduli nella normativa RAEE. Le future attività approfondiranno questi ed altri aspetti connessi alla problematica esposta.

bibliografia

- [1] Fthenakis, V. M., 2003. Overview of potential hazards. Chapter VII-2, Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, General editors T. Markvart and L. Castaner, published by Elsevier in 2003. ISBN 1-856-17390-9.
- [2] Fthenakis, V. M., Kim, H. C., Alsema, E., 2008. Emissions from Photovoltaic Life Cycles. *Environ. Sci. Technol.* 42, 2168-2174.
- [3] Hsu, D. D., O'Donoghue, P., Fthenakis, V., Heath, G. A., Kim, H. C., Sawyer, P., Choi, J., Turney, D., 2012. Lifecycle greenhouse gas emissions of crystalline silicon photovoltaic electricity generation. *J. Ind. Ecol.* 16, 122-135.
- [4] Nugent D., Sovacool B. K., 2014. Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey. *Energy Policy* 65 (2014) 229-244
- [5] Peng, J., Lu, L., Yang H., 2013. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19, 255-274
- [6] Alsema, E. A., de Wild-Scholten, M. J., Fthenakis, V. M., 2006. Environmental impacts of PV electricity generation – A critical comparison of energy supply options. Presented at the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 4-8 September 2006.
- [7] Alsema, E. A., de Wild-Scholten, M. J., 2006. Environmental Impacts of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production. Presented at 13th CIRP Intern. Conf. on Life Cycle Engineering, Leuven, 31 May- 2 June 2006.
- [8] Fthenakis, V. M., Fuhrmann, M., Heiser1, J., Lanzirotti, A., Fitts, J. and Wang, W., 2005. Emissions and Encapsulation of Cadmium in CdTe PV. Modules During Fires. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 13, 713-723.
- [9] McDonald, N.C., Pearce, J.M., 2010. Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules. *Energy Policy* 38, 7041-7047
- [10] Kang, S., Yoo, S., Lee, J., Boo, B., Ryu, H., 2012. Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. *Renewable Energy* 47, 152-159.
- [11] Appleyard, D., 2009. Light cycle: recycling PV materials. *Renewable Energy World*, March- April, 28-35.
- [12] EPIA, 2012. Global Market Outlook for Photovoltaics Until 2016. Commissioned Publication, Brussels, Belgium. [http://www.epia.org/fileadmin/user\\_upload/Publications/Global-Market-Outlook-2016.pdf](http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/Global-Market-Outlook-2016.pdf)
- [13] EPIA, 2013 Report Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017. [http://www.epia.org/fileadmin/user\\_upload/Publications/GMO\\_2013\\_-\\_Final\\_PDF.pdf](http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/GMO_2013_-_Final_PDF.pdf)
- [14] Fthenakis, V. M., 2000. End-of-life management and recycling of PV modules. *Energy Policy* 28, 1051-1058.
- [15] Berger, W., 2010. A novel approach for the recycling on thin film photovoltaic modules, resources. *Conservation and Recycling* 54, 711-718.
- [16] Gottesfeld, P., Cherry, C. R., 2011. Lead emissions from solar photovoltaic energy systems in China and India. *Energy Policy* 39, 4939-4946.
- [17] V. Monier, M. Hestin (Bio Intelligence Service), Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE Directive, Progetto europeo ENV.G.4/FRA/2007/0067, Rapporto Finale, aprile 2011.
- [18] M. Tammaro, J. Rimauro, V. Fiandra, A. Salluzzo, 2013. Experimental tests for the determination of emissions of metals during the heat treatment of samples of crystalline silicon photovoltaic module. *Ecomondo Proceedings*, Ed. Maggioli 2013
- [19] M. Tammaro, A. Salluzzo, J. Rimauro, 2013. Preliminary tests for the experimental verification of the emission of metals during the heat treatment in air samples of the photovoltaic panels at the end of life. *EnergyMed* 2013
- [20] C. Privato, A. Salluzzo, S. Manzo, M. Tammaro, 2013, Studio sperimentale per analizzare il rischio di rilascio di elementi pericolosi, in particolare metalli, presenti nella composizione dei pannelli fotovoltaici esausti se abbandonati nell'ambiente, *Consulenza Tecnico Specialistica* 2013.
- [21] M. Tammaro, J. Rimauro, V. Fiandra, A. Salluzzo, 2014. 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. Submitted to journal, 2014.
- [22] M. Tammaro, S. Manzo, J. Rimauro, A. Salerno, A. Salluzzo, S. Schiavo, C. Privato, 2014. The photovoltaic panel as an electronic waste: experimental study of metal release in the environment. *EU PVSEC 2014*, Amsterdam, 2014