

Il contributo alla sostenibilità della fase *end of life* della filiera fotovoltaica

La crescente penetrazione della tecnologia fotovoltaica nei mercati energetici esige un profondo ripensamento delle modalità di gestione della fase *end of life* della filiera, al fine di favorire l'affermazione di paradigmi energetici improntati a una maggiore sostenibilità economica, ambientale e sociale

DOI 10.12910/EAI2017-021

di **Daniela Sica** e **Ornella Malandrino**, Dipartimento di Scienze Aziendali - Management & Innovation Systems (DISA-MIS), Università degli Studi di Salerno

L'analisi approfondita delle interconnessioni esistenti tra opzioni energetiche, crescita economica, tutela dell'ambiente naturale e ricadute sociali si rileva una necessità incontrovertibile per poter realizzare una prospettiva di sviluppo rinnovata, capace di interpretare e declinare in modo idoneo quella che oggi viene comunemente identificata *green economy*.

Al momento, infatti, cresce la consapevolezza che l'attuale sfida legata all'affermazione delle tecnologie

tese alla diffusione della *green energy*, richiede la corretta misurazione e valutazione degli impatti economici, ambientali e sociali associati all'intero ciclo di vita delle singole filiere energetiche emergenti, con un approccio basato sul *Life Cycle Management* (LCM), secondo una prospettiva *Life Cycle Thinking* (LCT).

Ciò al fine di offrire ai *policy maker* e agli operatori economici, nonché alle comunità interessate e alla collettività in generale, elementi di valutazione, in merito alle differenti opzioni energetiche, caratterizzati da

coerenza, completezza, trasparenza e chiarezza.

La tecnologia fotovoltaica (FV), com'è ben noto, produce "energia verde", caratterizzata dall'uso del sole, una fonte rinnovabile e gratuita, e da emissioni atmosferiche quali ad esempio anidride carbonica e altri gas a effetto serra, "nulle". Tuttavia, durante il suo intero ciclo di vita – dalla produzione dei moduli FV al loro smaltimento finale – si utilizzano notevoli quantità di risorse non rinnovabili e di differenti tipologie di fonti energetiche, generando in-

quinamento e rifiuti a elevato impatto ambientale.

In previsione dello smaltimento dei moduli entrati in produzione negli ultimi anni, peraltro con ritmi impetuosi soprattutto in alcuni paesi, tra i quali il nostro, occorre affrontare con urgenza le differenti dimensioni (tecnologiche, economiche, ambientali ecc.) del problema della loro dismissione, allo scopo di intraprendere un percorso che sia davvero sostenibile dal punto di vista tecnico-economico e socio-ambientale.

Il presente lavoro ha l'obiettivo di

in media, oltre l'80% del peso dei materiali utilizzati nella produzione di un modulo in silicio cristallino (c-Si) è costituito da materiali di copertura (vetro), dalla cornice di sostegno in alluminio anodizzato nonché dal sigillante in etilene vinil acetato (EVA). Il peso di tali sostanze aumenta significativamente nei moduli che utilizzano telloruro di cadmio (CdTe) e diseleniuro di rame e indio (CIS) o di rame indio e gallio (CIGS), pur se con una differente composizione.

Le percentuali dei materiali utilizza-

FV alla fine del loro ciclo di vita risulta essere una fase particolarmente importante per valorizzare materiali che, se sottoposti a incenerimento, andrebbero perduti e, se dismessi, andrebbero dispersi nell'ambiente con effetti dannosi.

Dalle componenti metalliche della matrice delle celle, infatti, possono essere recuperati il rame interno ai *ribbon*, l'argento utilizzato nei contatti, lo stagno e il piombo delle paste saldanti impiegate industrialmente nei processi di nastratura (*tabbing* e *bussing ribbon* delle celle), il silicio

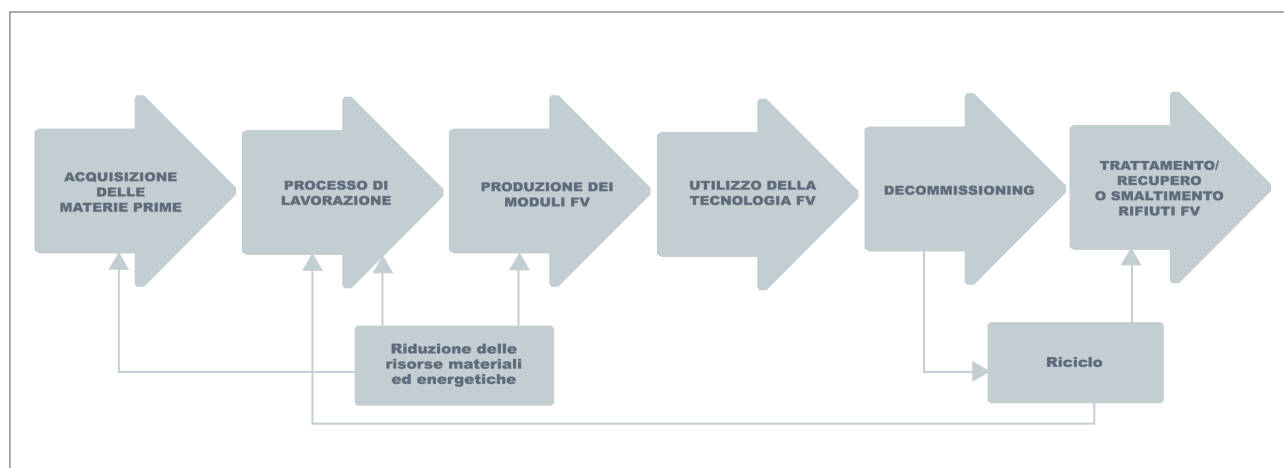


Fig. 1 La filiera fotovoltaica e le opportunità di valorizzazione delle risorse

evidenziare le notevoli opportunità di carattere economico, sociale e ambientale che potrebbero derivare da una corretta gestione del fine vita dei moduli.

Criticità ed opportunità della fase end life della filiera fotovoltaica

Le varie tipologie di moduli FV presenti sul mercato, hanno una differente struttura, in termini di materiali utilizzati, di dimensione, peso e prestazioni. Nonostante ciò,

ti nella produzione dei moduli che potrebbero essere recuperati sono particolarmente elevate per il vetro e l'alluminio (rispettivamente 95% e 100%), più contenute, ma ugualmente significative, per il rame e il tellurio (circa il 90%), poco significative per i metalli rari e/o preziosi quali indio, argento, germanio e gallio (oltre il 30%) [1][2].

Sono, inoltre, presenti in alcune tipologie di moduli, seppur in quantità modeste, metalli considerati tossici (ad esempio, piombo e cadmio) [3]. Pertanto, la gestione dei pannelli

dei wafer e, ancora, l'argento contenuti nelle paste serigrafiche con cui si effettuano i trattamenti antiriflesso delle celle.

Recentemente, si stanno affermando interessanti iniziative per individuare nuovi processi di trattamento e riciclo *tailored* per il settore del fotovoltaico che, seguendo un approccio di filiera, dovrebbero porsi obiettivi più ambiziosi del recupero del vetro e dell'alluminio, puntando a recuperare parti e componenti del modulo che potrebbero essere maggiormente valorizzati.

Una considerazione particolare deve essere fatta sui metalli rari presenti nei pannelli fotovoltaici, quali ad esempio indio, argento e gallio che, pur raffigurando complessivamente il valore di circa 1% del peso del pannello, presentano un valore rilevante, stimato al 2030, pari a quasi 200 milioni di euro¹ [4][5].

Inoltre, risulta di rilevante interesse anche la raccolta e il riciclo del rame e del tellurio, per i vantaggi che ne potrebbero derivare sia da un punto di vista economico che ambientale.

Il tellurio potrebbe, infatti, essere riutilizzato nel ciclo produttivo dei moduli CdTe, riducendone la domanda, in un'ottica di ottimizzazione nell'uso di risorse sempre più scarse in natura.

Il recupero del rame, invece, può rivelarsi economicamente utile, soprattutto per l'Italia, che soddisfa la sua domanda interna (circa 1 Mt nel 2013) ricorrendo principalmente alle importazioni (61,4%) e, solo per il 38,6%, al riciclo [6].

È indispensabile una gestione appropriata del fine vita dei rifiuti FV, al fine non solo di consentire il recupero e il riciclo, in altri processi produttivi, di risorse talvolta limitate in natura ma anche di smaltire in modo corretto sostanze pericolose quali il cadmio presente nei moduli a film sottile e il piombo nei moduli c-Si.

Le quantità di piombo presenti nei moduli c-Si variano da 1,64 g a 11,4 g per pannello risultando leggermente superiori a quelle di cadmio nei moduli CdTe che spaziano da 0,32 g a 11,4 g.

I costi relativi all'inquinamento provocato dalla lisciviazione dei materiali contenenti piombo e cadmio non adeguatamente smaltiti sono stati approssimativamente stimati pari rispettivamente a 1.174,00 €/kg e 46,00 €/kg. Sulla base di tali valu-

tazioni è possibile prevedere che nel 2050, lo smaltimento improprio di 3.381 t di piombo contenuto principalmente nei moduli c-Si (che presentano una lisciviazione media di 1.741,2 t) e 877 t di cadmio contenute nei moduli CdTe (con una lisciviazione media di 302,5 t), potrebbero avere un costo rispettivamente di oltre 2 miliardi di euro e circa 14 milioni di euro [2].

Recenti studi [1] hanno, inoltre, evidenziato i notevoli benefici in termini ambientali collegati all'attività di riciclo rispetto all'utilizzo della discarica. Basti pensare che il riciclo di 185 tonnellate di moduli fotovoltaici – effettuato in un impianto pilota la cui potenza è di 2,46 MW e nel quale vengono sottoposti a trattamento solo moduli in silicio mono e poli cristallino – consente di risparmiare circa 1.480-2.220 t CO₂-eq. Tale risparmio si aggiunge ai benefici ambientali derivanti dall'utilizzo della tecnologia fotovoltaica per la produzione di energia elettrica e riconducibili a una riduzione di circa 49.470 tCO₂-eq per tutta la durata utile dell'impianto (circa venti anni). È stato, inoltre, stimato che dal riciclo di 1.480 tonnellate di moduli fotovoltaici di un impianto industriale di

19,73 MW – nel quale vengono sottoposti a trattamento tutti i moduli fotovoltaici – è possibile ottenere una riduzione di circa 11.840-17.760 tCO₂ equivalente, che si aggiunge ai 396.770 tCO₂ equivalenti evitate durante l'arco di vita dell'impianto.

Altri studi [4] hanno analizzato i considerevoli vantaggi socio-economici legati al recupero e al riciclo dei moduli fotovoltaici seguendo un approccio *from cradle to cradle* per realizzare una virtuosa “chiusura del cerchio” (Figura 1).

Il settore FV, infatti, potrebbe rappresentare un esempio chiave nell'adozione di modelli improntati alla promozione di un'economia circolare in ogni fase della catena del valore. Un approccio che implica un vero e proprio cambiamento sistemico e un forte impulso innovativo, non solo sul piano tecnologico, ma anche organizzativo e sociale, come recentemente evidenziato nell'*Action Plan “Closing the loop: an EU action plan for the circular economy”* emanato il 2 dicembre 2015 dalla Commissione Europea.

Attualmente, i rifiuti FV prodotti provengono prevalentemente da scarti di produzione ed essendo esigui – poco meno di 17.000 t,

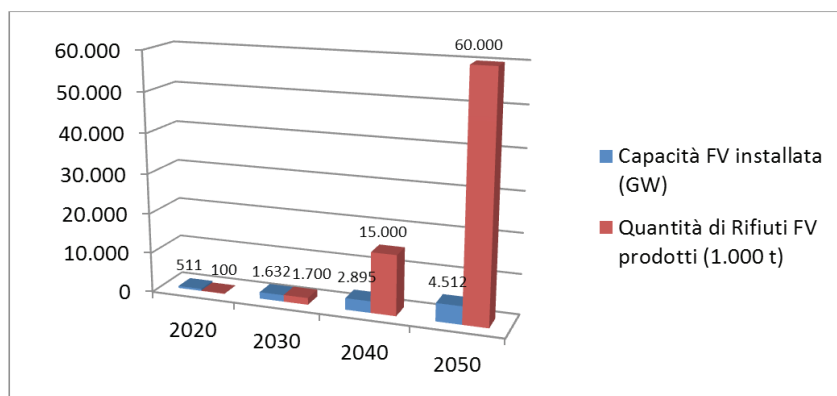


Fig. 2 Trend evolutivo dei rifiuti FV generati a livello mondiale
Fonte: elaborazione su dati IEA e IRENA

nel 2015, in Europa e poco più di 43.000 t, entro la fine del 2016, a livello mondiale² - rendono economicamente poco conveniente sia il recupero sia il riciclo. Tuttavia, alcune previsioni³, come mostra la Figura 2, evidenziano che a partire dal 2025-2030, allorché giungeranno a fine vita i moduli entrati in produzione negli ultimi decenni, la fase di *decommissioning* della filiera fotovoltaica potrà porsi obiettivi di riciclo e recupero molto più ambiziosi. Sulla base delle stime effettuate nello studio condotto da IEA e IRENA [4], a fronte di un incremento della capacità fotovoltaica installata a livello globale che dovrebbe raggiungere i 1.600 GW entro il 2030, si avrà un aumento dei rifiuti fotovoltaici che dovrebbero attestarsi su 1,7 milioni tonnellate. Un valore, quest'ultimo, che non tiene in considerazione né i rifiuti generati a seguito di guasti che potrebbero verificarsi prima che si concluda il ciclo di vita utile del pannello (circa 30 anni) né quelli derivanti dalla realizzazione di pannelli non idonei all'uso.

Tenendo conto delle quantità di rifiuti FV che possono essere recuperati, trattati e riciclati (Tabella 1) e dei prezzi di mercato (metà 2016), la fase "end of life" del settore fotovoltaico potrebbe generare un valore di oltre 400 milioni di euro. Un valore che, se reinvestito nel settore FV, potrebbe consentire di produrre circa 60 milioni di nuovi pannelli ovvero 18 GW di potenza.

L'affermazione di una gestione sostenibile e responsabile dei rifiuti FV dischiude, dunque, nuove prospettive per le organizzazioni che operano in tale settore e che sempre più sono chiamate ad assumere un ruolo da protagoniste in un nuovo scenario economico in cui si promuove un agire d'impresa capace

Materiali	Produzione mondiale (2015) espressa in 1.000 t	Quantità recuperabili in t (2030)
Argento	27.300	90
Altri metalli	Zinco	390
	Nichel	
	Stagno	
	Piombo	
	Cadmio	
	Gallio	
	Indio	
	Selenio	
Tellurio	>120	
Rame	18.700	7.200
Silicio	8.100	29.500
Alluminio	58.300	75.000
Polimero	-	101.300
Vetro	-	965.100
Sigillante	-	120
Semiconduttori composti	-	310

Tab. 1 Produzioni mondiali e quantità recuperabili dei principali materiali utilizzati per la realizzazione dei moduli

Fonte: elaborazione su dati IEA e IRENA

di coniugare efficacemente responsabilità e competitività per la realizzazione di uno sviluppo diffuso e duraturo.

Affinché ciò avvenga, però, è necessario, un approccio collaborativo tra la *business community*, i *policy maker* e le istituzioni, al fine di adottare modelli che favoriscano il cambiamento sistemico del settore verso gli obiettivi propri dell'economia circolare.

Conclusioni

Nei prossimi anni il settore FV dovrà essere in grado di affrontare, da un lato, le sfide imposte dalle innovazioni tecnologiche e, dall'altro quelle legate a una gestione sostenibile, a livello energetico, ambientale ed eco-

nomico, delle attività di smaltimento e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita, pianificandone fin d'ora le complesse attività.

Sicuramente rivestirà un ruolo strategico la progettazione in chiave ecologica dei sistemi fotovoltaici attraverso una diffusa inclusione in tale fase delle tecniche di *design for environment* e, in particolare, di *design for disassembly* e di *design for recycling*.

Infatti, un elemento di forte criticità nell'ambito dell'attività di riciclo è riconducibile alla rimozione dell'incapsulante del laminato impiegato nei moduli (il più diffuso è l'EVA) per gli elevati consumi di energia nei processi termici ad alte temperature, per l'impiego di sol-

venti nonché per il trattamento dei fumi di processo. Molteplici sono le metodologie di tipo fisico/meccanico, chimico e termico che possono essere adottate in base alla composizione del *backsheet* di modulo che, tuttavia, non consentono un completo recupero dei componenti dei pannelli FV.

A tal proposito sono stati condotti numerosi studi volti a individuare soluzioni progettuali che rendano i moduli più facili da disassemblare e, quindi, da riciclare. Sono, inoltre, in corso attività di ricerca e sviluppo sia di materiali e di sostanze – alternative a quelle attualmente usate – che presentano minori rischi per la salute umana e per l'ambiente che di processi produttivi a ridotto impatto ambientale.

Gli attori della fase *end life* della filiera FV, invece, stanno effettuando

importanti progressi nello sviluppo e diffusione di modalità organizzative e tecnologiche idonee all'affermazione di un rinnovato paradigma nella gestione dei rifiuti.

Una spinta verso una gestione responsabile del fine-vita dei moduli FV si è avuta in Europa con l'emanazione della Direttiva sui Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche - RAEE (Dir. 2012/19/UE) che ha testimoniato un innovativo cambio di prospettiva rispetto al passato.

Tale Direttiva, che ingloba uno dei più importanti meta-principi di politica ambientale quali quello della "responsabilità estesa del produttore", integra la normativa europea in materia di gestione dei rifiuti e prevenzione della loro produzione, attraverso il riutilizzo e riciclaggio di rifiuti elettrici ed elettronici, ivi

compresi per la prima volta i moduli FV. Ciò allo scopo di ridurre il volume e, contestualmente, valorizzare l'uso di materie prime secondarie, favorendo un utilizzo più efficiente delle risorse naturali impiegate.

È pur vero che una corretta affermazione e un soddisfacente sviluppo di un efficace ed efficiente sistema di gestione dei rifiuti a livello innanzitutto locale, di conseguenza globale, saranno frutto di un processo graduale, in cui tutti i soggetti coinvolti – produttori, progettisti, utenti/consumatori, istituzioni pubbliche ecc. – dovranno acquisire esperienza e maturità per cogliere appieno le opportunità e realizzare un efficace miglioramento di tutte le performance, da quelle economiche a quelle tecnologiche ed ambientali della filiera FV.

¹ Tale valore si basa sulle stime delle quantità di moduli da smaltire effettuate al 2030 e sugli attuali prezzi di mercato (aprile 2016) (pari a 510 €/kg per l'argento, 209 €/kg per l'indio, 117 €/kg per il gallio)

² Tale quantità rappresenta un valore solo di 1% del totale dei pannelli installati a livello mondiale (circa 4 milioni di tonnellate)

³ Le stime sui rifiuti tengono conto solo delle quantità dei moduli fotovoltaici dismessi a fine vita (considerando un ciclo di vita di circa 30 anni)

BIBLIOGRAFIA

[1] F. Cucchiella, I. D'Adamo, P. Rosa (2015), "End-of-Life of used photovoltaic modules: A financial analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, pagg. 552-561, Elsevier

[2] A. Paiano (2015), "Photovoltaic waste assessment in Italy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, pagg. 99-112, Elsevier

[3] M. Tammaro, A. Salluzzo, S. Manzo, C. Privato (2014), "Impatto ambientale dei rifiuti fotovoltaici", *Energia Ambiente e Innovazione*, 2-3, pagg. 33-40, rivista edita da ENEA

[4] IEA and IRENA (2016), "End-of-life management: solar photovoltaic panels". http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf

[5] Legor group (2016), "Quotazione metalli", <http://www.legor.com/it/quotazione-metalli> (ultimo accesso: 25/09/2016)

[6] Istituto Italiano del Rame (2013). "Dati e statistiche", <http://www.copperalliance.it> (ultimo accesso: 18.03.16)