

La gestione dei moduli fotovoltaici a fine vita

1. L'installato fotovoltaico nel mondo e in Italia

Negli ultimi anni, la progressiva riduzione dei costi della tecnologia e l'implementazione di misure per aumentare l'efficienza delle celle fotovoltaiche (FV) hanno determinato un rilevante incremento delle installazioni FV a livello mondiale. Alla fine del 2019 la capacità fotovoltaica cumulativa installata a livello globale ammontava a oltre 600 GW (Figura 1) ([IEA PVPS Snapshot of Global Photovoltaic Markets, 2020](#)).

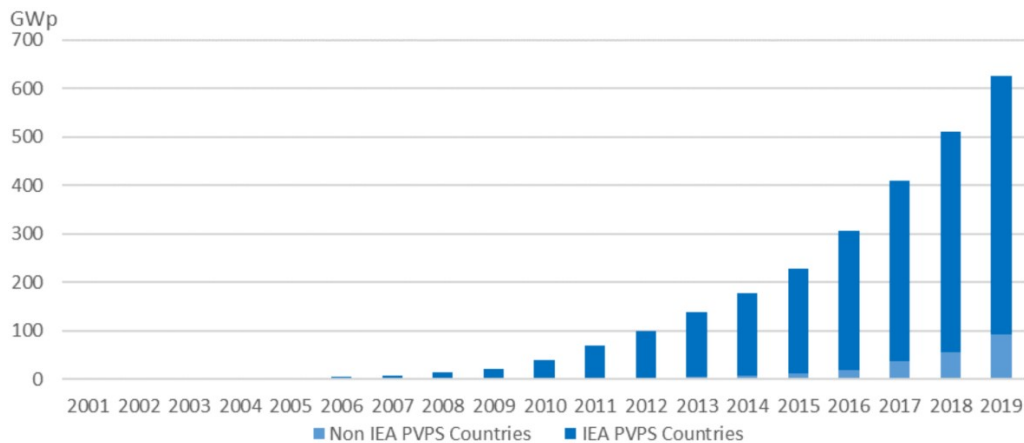


Figura 1 - Capacità fotovoltaica cumulativa installata a livello globale a fine 2019
(fonte: IEA PVPS - Snapshot of Global Photovoltaic Markets, 2020)

In Italia, dopo il boom delle installazioni FV del periodo 2010-2013 e la conclusione del sistema di incentivazioni “Conto energia”, il trend di installazioni è rallentato (Figura 2), sebbene vengano già realizzati impianti utility scale in regime di market parity.

Il crescente numero di installazioni mette in evidenza il tema della gestione dei rifiuti derivanti da moduli fotovoltaici a fine vita.

In Italia, ipotizzando una vita utile dei moduli pari a 20 anni¹, i moduli da smaltire al 2033 (20 anni dopo il picco di installazioni FV) potrebbero ammontare a circa 18 GW: quindi circa 1,44 Mln di tonnellate di moduli². Va subito chiarito che **tali moduli saranno da avviare al riciclo come da regolamentazioni in vigore (vedi 2.1) e non da smaltire in discarica**, come erroneamente si potrebbe pensare.

Se poi si ipotizza di avviare a riciclo 50 GW di moduli fotovoltaici nel 2050 (20 anni dopo il previsto raggiungimento degli obiettivi del PNIEC) i moduli da smaltire sarebbero circa 2,8 Mln di tonnellate³.

¹ La vita utile dei moduli può essere anche 30 anni; a 20 anni scade la garanzia del Costruttore per una diminuzione complessiva della potenza generata pari al 20%.

² Considerando una potenza nominale per modulo FV di 250W ed un peso di 20kg/modulo (modulo tipico del periodo 2010-2013), nonché il riutilizzo in altri impianti dei moduli che vengono eventualmente smontati dopo 10 anni (perché considerati obsoleti rispetto a moduli di nuova produzione).

Lo sviluppo del Fotovoltaico in Italia

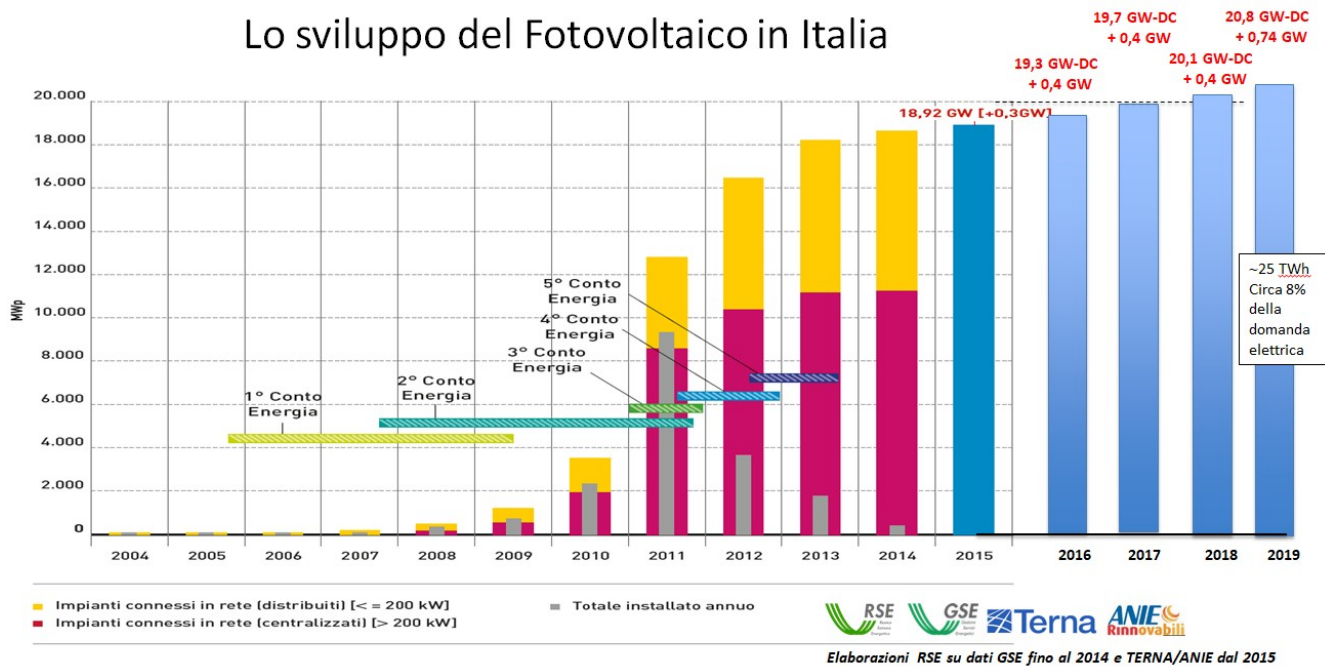


Figura 2 - Capacità fotovoltaica cumulativa installata in Italia a fine 2019 e incremento annuale

2. Il quadro legale/regolamentare

2.1 La regolamentazione del recupero e riciclo dei moduli a fine vita

a. Disciplinare Tecnico del GSE del Dicembre 2012 per i moduli del IV e V Conto energia

In seguito al boom di installazioni FV incentivate dal programma Conto Energia nel 2011 e nel 2012 (circa 10 GW in 12 mesi), i moduli installati in Italia hanno raggiunto quantità rilevanti: più di 80 milioni al 2012.

Ciò ha reso evidente, già allora, la necessità di gestire i materiali derivanti da moduli fotovoltaici a fine vita.

GSE, in collaborazione con RSE, e con il coinvolgimento di vari operatori FV (Costruttori, Installatori e Consorzi di trattamento di rifiuti), ha emesso nel Dicembre 2012 il Disciplinare Tecnico per "Definizione e verifica dei requisiti dei Sistemi o Consorzi per il recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita".

Tale documento, fra l'altro, istituiva una rete di Consorzi conformi ai requisiti del GSE per il riciclo dei moduli e imponeva la creazione di fondi *Trust* in cui versare un contributo per ogni modulo ammesso all'incentivazione dal 2011 (anno del boom) al 2013 (anno di chiusura del Conto energia).

In base al Disciplinare del GSE, sono responsabili dell'invio al riciclo dei moduli, in sequenza di responsabilità, i Produttori / Importatori o i Distributori o gli Installatori e, in caso di loro assenza, il Soggetto Responsabile dell'impianto in cui i moduli sono installati.

3 Considerando una potenza nominale per modulo FV di 400 W ed un peso di 22 kg/modulo (modulo tipico del periodo 2020-2030), nonché il riutilizzo in altri impianti dei moduli che vengono eventualmente smontati dopo 10 anni (perché considerati obsoleti rispetto a moduli di nuova produzione).

b. Decreto Legislativo n. 49 del 14.03.2014

Nel 2014 la gestione dei rifiuti derivanti da moduli fotovoltaici è stata disciplinata con la Direttiva Europea 2012/19/UE sui Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE) che ha incluso per la prima volta tra i RAEE anche i moduli fotovoltaici.

Con il Decreto Legislativo n. 49 del 14.03.2014 «Attuazione della direttiva 2012/19/UE sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE)» in Italia si è estesa la regolamentazione a tutti i moduli fotovoltaici⁴ installati o da installare.

In Fig. 3 sono indicate le fasi per la gestione dei moduli fotovoltaici a fine vita, secondo il D.Lgs. 49/2014. In particolare tale D.lgs. fornisce le seguenti definizioni:

- recupero: qualsiasi operazione il cui principale risultato sia di permettere ai rifiuti di svolgere un ruolo utile, sostituendo altri materiali che sarebbero stati altrimenti utilizzati per assolvere una particolare funzione o di prepararli ad assolvere tale funzione, all'interno dell'impianto o nell'economia in generale.
- riciclaggio⁵: qualsiasi operazione di recupero attraverso cui i rifiuti sono trattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze da utilizzare per la loro funzione originaria o per altri fini. Include il trattamento di materiale organico ma non il recupero di energia né il ritrattamento per ottenere materiali da utilizzare quali combustibili o in operazioni di riempimento;
- riutilizzo: qualsiasi operazione attraverso la quale prodotti o componenti che non sono rifiuti sono reimpiegati per la stessa finalità per la quale erano stati concepiti;
- smaltimento: qualsiasi operazione diversa dal recupero anche quando l'operazione ha come conseguenza secondaria il recupero di sostanze o di energia.

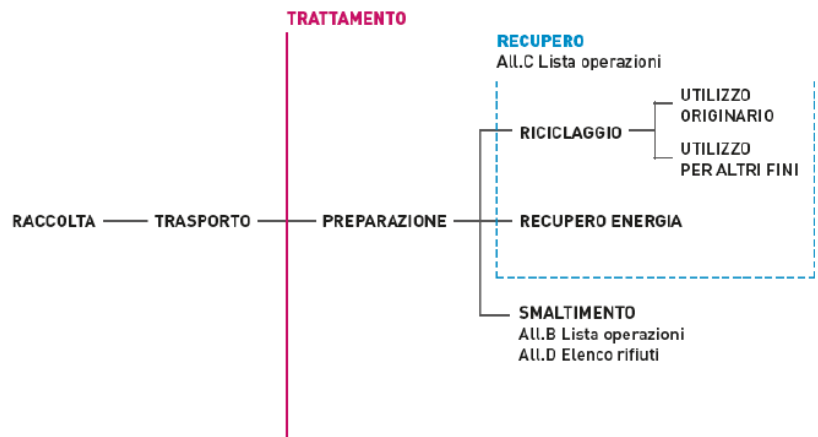


Figura 3 – Le fasi di gestione dei rifiuti generati da moduli fotovoltaici a fine vita (D.Lgs. 49/2014)

Il D.Lgs. 49/2014 (come già la Direttiva 2012/19/UE) indica che i responsabili della gestione dei RAEE sono i Produttori/Distributori delle apparecchiature stesse, proporzionalmente alla quantità dei nuovi

⁴ Il D.lgs. 49/2014, così come la Dir.EU, usa il termine “pannello fotovoltaico” mentre il Disciplinare Tecnico del GSE utilizza il termine “modulo fotovoltaico”; le due definizioni sono comunemente utilizzate con lo stesso significato, anche se le norme italiane e internazionali sul fotovoltaico forniscono significati differenti.

⁵ Il D.lgs. 49/2014 usa il termine “riciclaggio”, mentre con lo stesso significato il DM 5/5/2011 (4° Conto energia), il DM 5/7/2012 (5° Conto Energia) e il Disciplinare Tecnico del GSE usano il termine “riciclo”.



prodotti immessi sul mercato, attraverso l'organizzazione e il finanziamento di sistemi di raccolta, trasporto, trattamento e recupero ambientalmente compatibile dei rifiuti.

In particolare il Produttore di moduli FV si iscrive al Registro Nazionale dei Soggetti obbligati al finanziamento dei sistemi di gestione RAEE e indica il Consorzio di riciclo a cui aderisce. Successivamente, il finanziamento del RAEE – fotovoltaico viene effettuato secondo la casistica indicata nello stesso D.lgs., come riportato nella Tabella 2.

In particolare in Tabella 2, per i moduli fotovoltaici, i RAEE di tipo “domestico” sono costituiti da “rifiuti originati da pannelli fotovoltaici installati in impianti di potenza nominale inferiore a 10 kW”, mentre i RAEE di tipo “professionale” sono quelli diversi da essi. .

Tabella 1

D.lgs. n. 49 del 14.03.2014

Attuazione della direttiva 2012/19/UE sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE)

Finanziamento RAEE			
Storici (AEE prima del 13/08/05) e Moduli FV prima del 28/03/14			
		Moduli FV incentivati	
<ul style="list-style-type: none"> • AEE non FV • Moduli FV non incentivati 		<ul style="list-style-type: none"> • 1°, 2°, 3° CE • 4° CE fino a 30/06/2012 • 4° CE dopo 30/06/2012 e 5° CE solo moduli a concentrazione solare o con caratteristiche innovative 	4° CE dopo 30/06/2012 e 5° CE, escluso moduli a concentrazione solare o con caratteristiche innovative Immessi nel mercato dal 13/08/05 (escluso moduli incentivati e non incentivati prima del 28/03/14)
Domestici	Professionali	Domestici	Professionali
<p>A carico dei produttori presenti sul mercato nello stesso anno in cui si verificano i rispettivi costi, in proporzione alla rispettiva quota di mercato, calcolata in base al peso delle AEE immesse sul mercato per ciascun tipo di apparecchiatura o per ciascun raggruppamento, nell'anno solare di riferimento (art. 23)</p>	<p>A carico del produttore nel caso di fornitura di una nuova AEE in sostituzione di un prodotto di tipo equivalente ovvero è a carico del detentore negli altri casi (art. 24)</p>	<p>A carico dei produttori presenti sul mercato nello stesso anno in cui si verificano i rispettivi costi, che possono adempiere in base alle seguenti modalità: a) individualmente, con riferimento ... (omissis) . al consumo delle proprie AEE; b) mediante un sistema collettivo, in proporzione alla rispettiva quota di mercato, calcolata in base al peso delle AEE immesse sul mercato ... (omissis) ..., nell'anno solare di riferimento. (art. 23)</p>	<p>A carico del produttore che ne assume l'onere per le AEE che ha immesso sul mercato (art. 24)</p>
		Disciplinare GSE	

Sono esclusi dalla contribuzione RAEE i moduli FV che rientrano nel IV e nel V Conto Energia, avendo già pagato la quota smaltimento secondo il Disciplinare GSE, come indicato dallo stesso nelle “Istruzioni Operative per la gestione e lo smaltimento dei pannelli fotovoltaici incentivati (GSE) (ai sensi dell’art. 40 del D.lgs. 49/2014)”.

2.2 Gli obiettivi del recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita

La Direttiva EU, così come il D.lgs. 49/2014, impone obiettivi ben precisi di recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita. Nell’allegato V del D.lgs. viene richiesto, in particolare, che siano raggiunti i seguenti limiti minimi applicabili per i RAEE trattati dal 15 agosto 2018:

- preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio del 80% in peso dei moduli gestiti
- recupero del 85% in peso dei moduli gestiti.

2.3 Nuove iniziative / prospettive per recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita

Con la previsione di un progressivo aumento dei moduli FV da avviare a riciclo (vedi par. 1), aumenta l’interesse dei Consorzi di riciclo a occuparsi di questa attività.

Recenti incontri di RSE con altri ricercatori (in particolare nell’ambito dell’IEA PVPS Task 12 “*PV Sustainability Activities*”) e con operatori del settore hanno fatto emergere indicazioni su nuove prospettive per il riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita:

1. secondo alcuni gestori di Stabilimenti di trattamento i processi di trattamento dei moduli ai fini del riciclo possono essere efficacemente e economicamente attuati a patto che ci sia un volume adeguato di moduli da trattare; questo numero dovrebbe essere superiore a circa 8.000 tonnellate/annue (cioè più di circa 140 MW/anno); giacché ad oggi questi volumi non sono ancora stati raggiunti, i moduli vengono trattati solo parzialmente (cioè solo per le operazioni meno costose) e il resto del rifiuto viene accantonato in attesa che si raggiunga un volume adeguato al trattamento da effettuare; il problema quindi non è tecnologico ma di quantità (che ancora oggi risulta insufficiente);
2. prima di avviare i moduli al riciclo è opportuno valutare la possibilità di riutilizzarli in situazioni meno impegnative (ad es., impianti con tensione di lavoro meno elevata o impianti con spazi di installazione più ampi, in cui è possibile usare moduli con rendimento più basso); l’argomento è in corso di studio da parte di RSE e ANIE, che nell’ambito del CEI CT82 hanno contribuito alla preparazione un Rapporto Tecnico (TR) sulla “Rigenerazione dei moduli FV”, di prossima pubblicazione;
3. Il DM MiSE 23/06/2016 ha incluso per la prima volta il termine “componente rigenerato” fra quelli da poter utilizzare negli impianti incentivati.

E’ infine da rimarcare con favore la tendenza, ad ora limitata, all’avvio delle iniziative sopra tratteggiate, volta ad attività di rigenerazione che favoriscono l’economia circolare incoraggiando il riutilizzo di prodotti e componenti.

3. Le tecniche del recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita

3.1 Tipologie di moduli

I moduli fotovoltaici installati a livello globale sono realizzati per oltre il 90% con celle in Silicio cristallino (c-Si); i restanti 10% sono realizzati con tecnologie a film sottili di vario genere (principalmente CdTe, Silicio amorfo, CIGS). Rispetto a tali quote di mercato, non sono previsti rilevanti cambiamenti nel breve-medio termine. Le successive considerazioni si limitano quindi, per semplicità, al caso di moduli in Silicio cristallino, mentre vengono accennate le iniziative intraprese dagli stessi produttori di moduli in CdTe.

3.2 Composizione del modulo

I moduli con tecnologia in c-Si hanno tipicamente una struttura multistrato composta da (Figura 4):

1. vetro frontale, temperato (spesso circa 4 mm)
2. pellicola di EVA (Etil Vinil Acetato) posta nel fronte e nel retro della matrice di celle
3. matrice di celle di silicio con dimensioni variabili dai 100 ai 156 mm, dotate di strato anti riflettente e dei contatti elettrici necessari a raccogliere la corrente elettrica prodotta;
4. collegamenti elettrici (rame) che connettono le celle in serie;
5. backsheet, realizzato generalmente con un foglio di Tedlar bianco (0,35 mm) o in alcuni casi in vetro;
6. cornice in alluminio anodizzato anticorrosione (circa 10% in peso);
7. scatola di giunzione (junction box), installata sul retro, è del tipo IP65 completa di cavi e di diodi di by-pass.

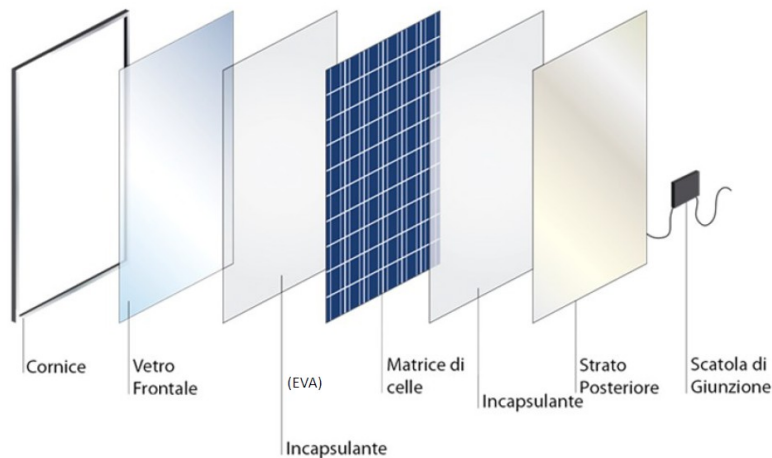


Figura 4 - Composizione di un modulo FV in Silicio Cristallino

I vari strati vengono sigillati fra loro attraverso un processo di laminazione, che consiste in genere nel riscaldamento - sotto vuoto - dei moduli fino a 140 °C, necessari a fondere l'EVA. Questa procedura garantisce che gli strati siano sigillati senza bolle d'aria all'interno.

In Figura 5 sono indicati in percentuale i materiali presenti in un modulo FV in silicio cristallino.

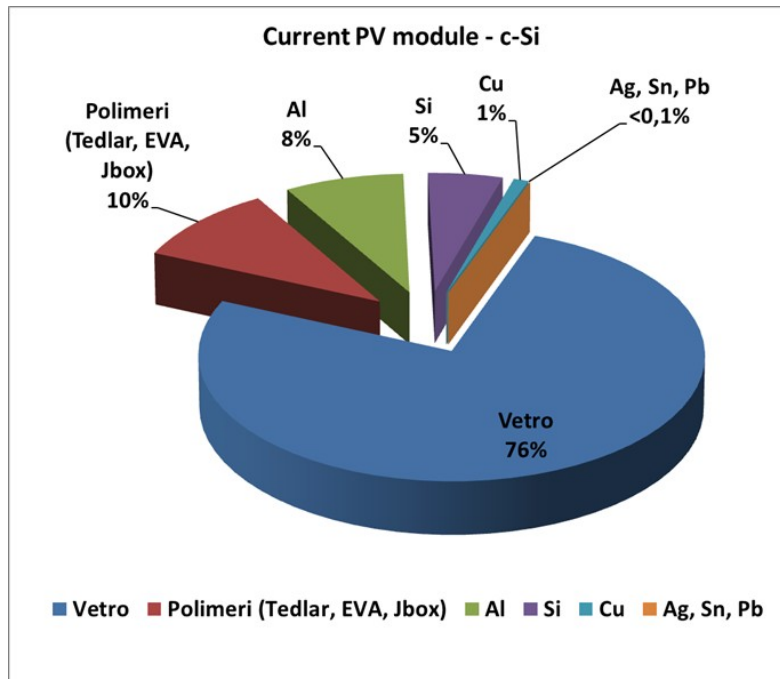


Figura 5 – Composizione in % dei materiali presenti in un modulo FV in c-Si

Tramite le diverse fasi di trattamento, è possibile recuperare materiali quali vetro (a seconda del metodo applicato si può ottenere anche vetro bianco ad elevata purezza), rame, alluminio, silicio (può essere recuperato per produrre nuove celle solari o essere utilizzato in siderurgia), e polimeri derivanti dalle materie plastiche della Junction Box. Questi non sono considerati elementi il cui recupero pone dei problemi ambientali. Tuttavia, la presenza di altri elementi quali l'argento e il piombo potrebbe essere oggetto di criticità da un punto di vista ambientale, se si considerano le attuali metodologie di trattamento ancora in fase pre-industriale.

È da notare comunque che l'impiego di questi elementi è limitato (<0.1%) e, secondo i nuovi trend al 2030 [4], il loro utilizzo sarà ulteriormente ridotto nella produzione dei moduli fotovoltaici.

Relativamente ai moduli in CdTe, l'utilizzo del Cadmio e del Tellurio (materiali oggetto di particolari attenzioni ambientali) è controllato a fine vita proprio da un sistema di riciclo attivato dal Produttore già in fase di avvio della commercializzazione in Europa. In ogni caso, come detto prima, a oggi la quota di mercato coperta da questa tecnologia è alquanto limitata.

3.3 Fasi di trattamento dei moduli

Attualmente, le tecniche di trattamento dei moduli per effettuare il riciclo sono alquanto varie e tutte in fase di sperimentazioni pre-industriali, giacché si cerca ancora di ottimizzarle per renderle adattabili alla gestione di volumi significativi di rifiuti. D'altronde la sperimentazione su ampia scala non è stata ancora possibile dato il numero sinora esiguo di moduli avviati al riciclo a fine vita.

Tuttavia, se si vogliono analizzare le fasi di riciclo dei moduli fotovoltaici attualmente adottate, si può fare riferimento a quelle indicate da RSE (Figura 6) nel Deliverable [1] per il progetto EU GOPV - *Global Optimization of integrated PhotoVoltaics system for low electricity cost*.

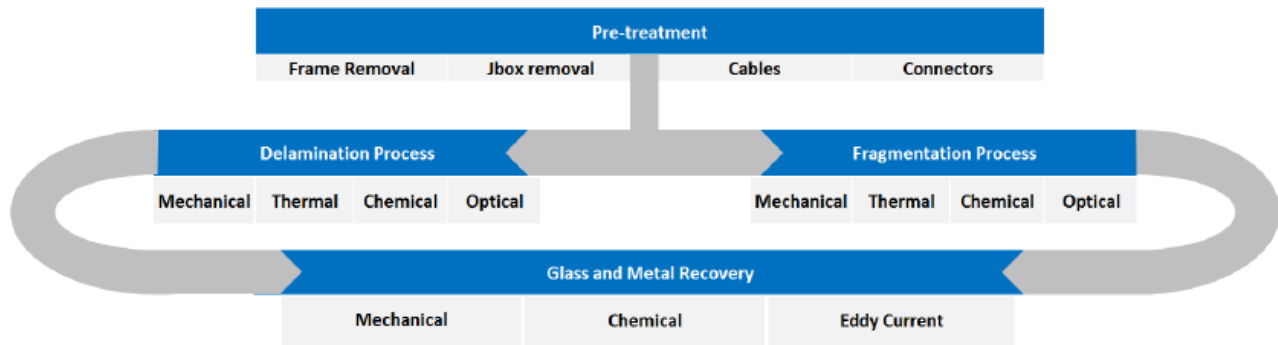


Figura 6 - Il processo di riciclo dei moduli FV in c-Si può essere suddiviso in tre fasi principali: a) pretrattamento, b) delaminazione \ frammentazione, c) recupero (Fonte: EU GOPV)

Riguardo ai processi di trattamento, la delaminazione consente una separazione più accurata dei componenti del modulo (il che può portare a un riciclaggio più efficiente e redditizio), ma attualmente la frammentazione (o triturazione) può essere eseguita senza importanti investimenti, poiché la rottura dei moduli fotovoltaici e la separazione dei materiali può essere effettuata, nella maggior parte dei casi, da impianti esistenti di riciclaggio e smaltimento dei rifiuti.

Generalmente la fase di triturazione, per i moduli in Silicio cristallino, avviene sotto aspirazione e quindi le emissioni vengono convogliate in apposito sistema di abbattimento (filtro a maniche) e successivamente inviate a camino. Le frazioni di materiali così trattati consentono di riciclare e reintrodurre in successive lavorazioni il 99,70% del campione, mentre il restante 0,3% può essere destinato a smaltimento secondo le norme vigenti. Va aggiunto che il residuo (circa 0,3%) contenente vetro-silicio-altro è attualmente fonte di differenti valutazioni. Sebbene a tale residuo sia possibile assegnare un codice indicato nel D.Lgs. 49 e quindi possa essere considerato un prodotto di riciclo (che i gestori degli stabilimenti di trattamento ritengono possa essere venduto tal quale ma che al momento viene semplicemente accumulato), sembra evidente che tale residuo necessita di un'ulteriore lavorazione per ottenere un vetro meno inquinato e per poter essere effettivamente riutilizzato.

Come detto nel par. 2.3, un ulteriore aspetto da considerare è il fattore economia di scala: infatti solo la lavorazione di grandi quantità di moduli può giustificare elevati investimenti (soprattutto nel caso dei metodi di delaminazione) e costi di trasporto. È un dato di fatto che attualmente il riciclo dei moduli c-Si non è economicamente praticabile. Secondo la stima riportata in recenti articoli, la dimensione minima dell'impianto che rende il processo economicamente sostenibile è di circa 7.000 t / anno di moduli fotovoltaici c-Si (Aleotti, 2018 [2]), anche se alcuni autori riportano cifre fino a 20.000 t / anno (D'Adamo, 2017 [3]). Secondo questi dati, va ricordato che entro una decina di anni in Italia si potrebbe raggiungere la quota minima di rifiuti da moduli fotovoltaici per rendere il processo di recupero e riciclo economicamente sostenibile.

Relativamente alle tecnologie meno diffuse quali CdTe, il principale produttore, First Solar, ha avviato già dal 2005 nello stabilimento di Francoforte (come fortemente voluto dal governo tedesco), il programma di riciclo dei propri moduli in CdTe. Tale programma prevede che chiunque desideri smaltire

moduli First Solar può richiederne gratuitamente la raccolta. Per ogni modulo venduto, First Solar accantona i fondi necessari a coprire i costi futuri di raccolta e riciclaggio, evitando ogni ulteriore addebito al proprietario del modulo. Gli accantonamenti vengono gestiti da un organismo esterno in modo da garantirne la disponibilità indipendentemente dalla condizione finanziaria di First Solar.

Il processo di riciclaggio First Solar permette di recuperare quasi tutte le parti del modulo e raggiungere tassi elevati di riciclo: fino al 95% del materiale semiconduttore può essere riutilizzato in nuovi dispositivi in CdTe e il 90% del vetro può essere trasformato in altri prodotti.

3.4 Problematiche ambientali ed economiche relative alla gestione dei moduli a fine vita

Le diverse fasi di trattamento per il recupero ed il riciclo dei moduli a fine vita che ad oggi sono state validate sperimentalmente, puntano a ridurre, o addirittura annullare, eventuali rischi per la salute e per l'ambiente [5].

Le fasi di trattamento dei moduli fotovoltaici in CdTe (Telloruro di Cadmio) generano talvolta allarme sui rischi per la salute e per l'ambiente, giacché il Tellurio (che fonde a 449°C) è tossico e il Cadmio (che fonde a 321°C) è estremamente tossico e pericoloso per l'ambiente. Tuttavia è da notare che la miscela di CdTe è non idrosolubile e fonde a 1041°C (sciogliendosi solo in acidi o sostanze ossidanti) e che il programma di riciclo del produttore, come sopra indicato, tende a eliminare i potenziali rischi che questa tecnologia potrebbe porre.

Riguardo gli aspetti economici della gestione dei moduli fotovoltaici a fine vita, varie analisi sono state effettuate già dal 2012 in varie occasioni da Organismi istituzionali, Centri di ricerca [8] [9], Operatori RAEE [6] [7] e Organizzazioni ambientaliste [10]. Da tali analisi, anche se basate su modeste quantità di moduli fotovoltaici da gestire, è stata riconosciuta la sostenibilità economica del processo definito dal D.lgs. 49/2014, non necessitando di ulteriori finanziamenti pubblici.

In conclusione, gli studi e le analisi della situazione condotte da vari Organismi, fra cui RSE nel corso di progetti per il programma di Ricerca di Sistema e tuttora oggetto di attenzione, consentono di affermare che l'intero processo di fine vita delle installazioni per la generazione di energia fotovoltaica è stato oggetto di specifiche studi da parte degli operatori e delle Autorità ed è adeguato allo stato dell'arte delle tecnologie disponibili, nonché integrato nell'intera filiera economica di sfruttamento della fonte energetica solare.

4. Bibliografia

- [1] G. Maugeri, G. Mela (RSE) - (2019, Settembre) - Analysis of cost-effectiveness for module recycling - Deliverable 1.4 del progetto EU GOPV - *Global Optimization of integrated PhotoVoltaics system for low electricity cost*.
- [2] Aleotti, F. (2018, Dicembre) - Recupero di moduli fotovoltaici in silicio cristallino a fine vita: progetto "FRELP - Full Recovery End-of-Life Photovoltaic". Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino.
- [3] D'Adamo, I., Miliacca, M., & Rosa, P. (2017). Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *International Journal of Photoenergy*.

- [4] Weckend, S., Wade, A., & Heath, G. (2016). *End-of-Life Management - Solar Photovoltaic Panels*. IRENA and IEA-PVPS.
- [5] P. Stolz, R.Frischknecht, Switzerland (2018). Life Cycle Assessment of Current Photovoltaic Module Recycling. IEA PVPS Task12
- [6] M. Zilla (COBAT) – “Recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita: il principio di responsabilità estesa dei produttori” - Convegno SolarExpo, Milano 7 Maggio 2014
- [7] F. Longoni (Centro di Coordinamento RAEE) – “Pannelli fotovoltaici: gestione del fine vita” – Convegno SolarExpo, Milano 8 aprile 2015
- [8] S. Guastella (RSE), C. Settimi (GSE) – “La gestione dei moduli fotovoltaici a fine vita negli impianti incentivati” – Convegno SolarExpo, Milano 8 aprile 2015
- [9] G. Maugeri (RSE) – “Il recupero e il riciclo dei moduli a fine vita”, Monografia RSE “Fotovoltaico: power to the people?” cap. 11, Luglio 2016
- [10] S. Notarnicola (Ambiente Italia) – “Recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita”, Quale Energia, Parte 1 2013 e Parte 2 2015