



REPORT SULLO STATO DELL'ARTE DELL'INIZIATIVA PROGETTUALE DEL CONSORZIO ECO-PV E DELL'ENEA (Agenzia per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile)

Processo innovativo per il recupero di materiali da moduli fotovoltaici a fine vita

Data: 28/05/2020



Sommario

1. Introduzione	3
2. Stato dell'arte delle tecnologie di trattamento dei RAEE fotovoltaici	5
3. Descrizione del progetto	8
4. Definizione del gruppo di lavoro, delle mansioni, delle potenzialità e delle competenze di ciascun soggetto per il raggiungimento degli obiettivi del progetto	12
5. Obiettivi di recupero attualmente raggiunti da ECO-PV ed ENEA.....	15
6. Conclusioni	19



1. Introduzione

Secondo il rapporto statistico “Solare Fotovoltaico 2018” del Gestore dei Servizi Energetici (GSE), in Italia alla fine del 2018 risultano in esercizio 20,11 GW di impianti fotovoltaici (FV), che corrispondono circa a 75.000.000 di moduli e a 1.440.000 tonnellate e rappresentano, inoltre, una quantità in costante crescita. Sulla base di questo dato si evince che la gestione del futuro fine vita dei moduli fotovoltaici può diventare una criticità ma può rappresentare anche un’opportunità se essi venissero gestiti tramite una tecnologia che risponda a requisiti di fattibilità economica sul piano industriale, che sia sostenibile dal punto di vista ambientale e che consenta di recuperare e riciclare materiali valorizzabili.

Inoltre, i moduli FV in silicio, prodotti negli anni 2009-2011, hanno una vita media pari a circa 25 anni; pertanto, tali moduli sono oramai prossimi alla fine del loro ciclo di funzionamento e vanno, pertanto, avviati allo smaltimento.

In questo ambito e secondo i principi dell’economia circolare, l’**Enea** (l’Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l’energia e lo sviluppo economico sostenibile) e il **Consorzio Eco-PV** (di seguito ECO-PV) collaborano per la realizzazione di un prototipo industriale per il trattamento dei moduli FV a fine vita basato su una tecnologia innovativa a basso impatto economico e ambientale mirata al recupero dei materiali con un elevato grado di purezza.

ECO-PV è uno dei principali consorzi italiani riconosciuti dal Gestore dei Servizi Energetici (di seguito GSE) ed autorizzati per lo smaltimento/trattamento/recupero dei Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (di seguito RAEE) e, grazie alle aziende collegate, possiede elevate competenze tecniche nella progettazione e realizzazione di impianti e processi nel settore ambientale.

“L’ENEA è l’Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l’energia e lo sviluppo economico sostenibile, ente di diritto pubblico finalizzato alla ricerca, all’innovazione tecnologica e alla prestazione di servizi avanzati alle imprese, alla pubblica amministrazione e ai cittadini nei settori dell’energia, dell’ambiente e dello sviluppo economico sostenibile”, come recita l’art. 4 della Legge 28 dicembre 2015, n. 221. Inoltre:

- l’ENEA detiene un insieme di competenze/conoscenze relative allo sviluppo ed alla fabbricazione di celle e moduli fotovoltaici con tecnologie standard e/o innovative;
- l’ENEA è attiva a livello di laboratorio nello studio e nella sperimentazione di processi innovativi per il recupero dei materiali provenienti dai RAEE.

ECO-PV, con il supporto dell’Enea, intende implementare le proprie infrastrutture per la gestione dei RAEE con impianti innovativi, appositamente studiati e realizzati per trattare in modo efficiente i moduli fotovoltaici (FV) conferiti al consorzio stesso. L’obiettivo che ECO-PV intende perseguire è massimizzare il recupero e il riciclo dei materiali costitutivi dei rifiuti fotovoltaici superando le soglie minime definite nell’Allegato V del Decreto Legislativo 14 marzo 2014, n.49 “Decreto RAEE” (85% in peso), tenendo conto degli impatti ambientali, sanitari, sociali ed economici, della fattibilità tecnica e della praticabilità economica, ai sensi dell’articolo 179 del Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152



“Testo Unico Ambientale”. Il processo che stanno sperimentando ECO-PV ed Enea mira a recuperare e riciclare anche i materiali contenuti nel restante 15% del modulo fotovoltaico, ovvero la parte costituita da celle, che contiene i vari materiali come il silicio, l’argento, il rame e altri metalli.

A tal proposito, nell’ambito del bando emanato dal **Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM)** nel 2018, dal titolo **“Bando per il cofinanziamento di progetti di ricerca finalizzati allo sviluppo di nuove tecnologie di recupero, riciclaggio e trattamento dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE)”**, ENEA ed ECO-PV sono risultati essere tra i vincitori con un punteggio di 88,75 e un contributo assegnato di € 300.000,00.

Inoltre, ECO-PV ed ENEA sono risultati vincitori anche del bando il **“Proof of Concept”** del 2018, un fondo di finanziamento ENEA finalizzato alla realizzazione di progetti innovativi scalabili a livello industriale.



2. Stato dell'arte delle tecnologie di trattamento dei RAEE fotovoltaici

Nell'attuale contesto dei RAEE fotovoltaici, il problema di gestione più urgente che necessita di un'appropriata soluzione è rappresentato dal fine vita dei moduli basati sul silicio (quantitativo maggiormente installato). Questi sono costituiti da vetro, polimeri e numerosi metalli il cui valore migliora l'economia globale dell'intero ciclo di vita dei moduli stessi. Inoltre, uno smaltimento non corretto degli scarti FV determina il rilascio nell'ambiente di sostanze nocive, derivanti ad esempio dalla degradazione dei materiali polimerici contenuti nella struttura dei moduli.

I principali problemi di gestione dei rifiuti FV sono costituiti ad oggi dalla mancanza, di una tecnologia univoca per il recupero di questi materiali, sostenibile dal punto di vista industriale ed a basso impatto ambientale.

Per questa ragione si è pensato di portare avanti un processo che tenesse conto di questi fattori considerando le prerogative del settore rifiuti dei materiali e quelle delle tematiche ambientali, senza dimenticare la questione della fattibilità economico-finanziaria dell'operazione stessa.

L'attività di ricerca industriale svolta da ECO-PV ed ENEA ha riguardato una preliminare analisi della letteratura in merito alle evidenze sperimentali già note relativamente ai processi di tipo meccanico ed un'indagine critica mirata al miglioramento dei processi esistenti ed allo sviluppo di un nuovo processo tecnologicamente avanzato per il trattamento ed il recupero dei materiali derivanti da rifiuti FV. La conoscenza qualitativa e quantitativa della tipologia dei materiali che costituiscono i rifiuti da trattare e che possono essere recuperati è alla base della definizione della tecnologia più idonea da utilizzare e sviluppare. A seconda della tipologia di fabbricazione dei moduli FV, questi possono essere costituiti infatti, da metalli e polimeri diversi. Al fine di sviluppare una tecnologia univoca, sostenibile dal punto di vista economico ed ambientale per l'industrializzazione di un processo di recupero dei vari materiali, è necessario esaminare preliminarmente la composizione degli strati che costituiscono la struttura dei pannelli e le varie tecnologie di trattamento attualmente in uso.

Il pannello fotovoltaico è costituito da una struttura detta "a sandwich" perché si possono distinguere più strati di materiali differenti. Il supporto posteriore (Backsheet) è realizzato con materiale isolante che presenta una scarsa dilatazione termica, nella maggior parte dei casi il Tedlar, un polimero che resiste all'invecchiamento. Come protezione anteriore si usa il vetro temperato, a elevata trasmittanza in modo da non bloccare l'energia solare e massimizzare le prestazioni energetiche del pannello fotovoltaico.

Nello strato centrale sono presenti le celle FV, costituite da silicio e collegamenti metallici, immerse in un polimero che svolge la funzione di isolante elettrico, l'Etilene Vinil Acetato (EVA). Per prevenire infiltrazioni di acqua successive alla fase di assemblaggio, il pannello è sigillato sottovuoto e il tutto viene installato in una cornice di alluminio utile per il fissaggio del pannello alla struttura di sostegno.

Nella Figura 1 e nella Tabella 1 sono riportati rispettivamente le tipologie di materiali costituenti i moduli fotovoltaici in silicio cristallino e le loro percentuali in peso più comuni (analisi svolta su pannelli prodotti tra il 2009-2011).

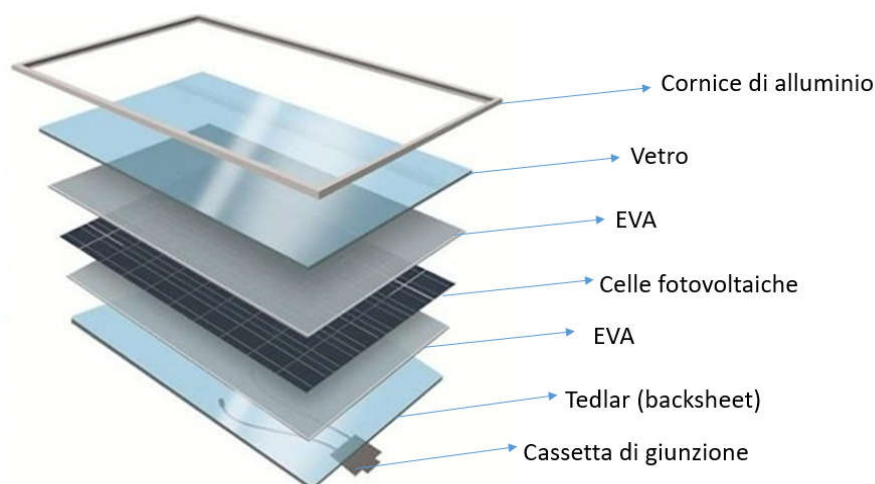


Figura 1. Materiali costituenti un modulo FV in silicio

Componenti del modulo PV	Quantità (% in massa)
Vetro	72
Cornice di Alluminio	12
Silicio	3,0
EVA	7,3
Backsheet (Tedlar)	2,4
Cassetta di giunzione	1,1
Adesivi	1,3
Cu	0,49
Ag	0,11
Sn	0,12
Pb	0,09
Altro	0,09

Tabella 1. Percentuali in peso dei materiali costituenti un modulo FV in silicio

I maggiori produttori di pannelli FV hanno sperimentato diversi metodi per la separazione e il recupero dei vari materiali derivanti da pannelli FV a fine vita. Le varie tecnologie investigate si possono suddividere per tipologie, in trattamenti di tipo fisico (la triturazione con separazione per densità o magnetica dei metalli), chimico (attacco acido/alcalino o dissoluzione con solventi organici), e termico (la pirolisi, l'incenerimento, la fusione dei materiali polimerici).



Con le tecnologie attuali è possibile recuperare circa l'85% in peso dei materiali costituenti un modulo fotovoltaico, ma per il restante 15%, costituito da polimeri, silicio delle celle, argento, altri metalli, il recupero necessita di ulteriori valutazioni di carattere tecnico ed economico. Esistono alcuni processi che sono fattibili tecnicamente, ma non sostenibili dal punto di vista economico né dal punto di vista ambientale. Infatti, il recupero delle componenti metalliche dei pannelli risulta complesso e richiede trattamenti aggiuntivi, costosi e con un impatto sull'ambiente, mentre il recupero delle materie plastiche è di scarso valore economico.

I processi studiati dalla comunità scientifica internazionale per il recupero ed il riciclo di materiali valorizzabili contenuti nei moduli basati sul silicio, quali vetro, Si, Al, Ag, Cu e polimeri, sono complessi, dispendiosi, impattanti sull'ambiente e soprattutto non univoci. Attualmente, le cornici di alluminio e le cassette di giunzione vengono separate manualmente dai pannelli solari, mentre vetro, Si, Cu, Ag possono essere recuperati mediante **metodi di tipo meccanico, termico o chimico** oppure mediante una combinazione di essi. Con il trattamento di tipo fisico attuale (frantumazione meccanica del modulo privato della cornice di alluminio e della cassetta di giunzione) si ottengono materie prime seconde con uno scarso grado di purezza, quindi non risultano completamente valorizzabili. Il trattamento di tipo termico sembra una strada poco percorribile in quanto i polimeri utilizzati per la composizione dei moduli hanno problematiche legate alle emissioni in atmosfera (come, ad esempio, il tedlar). Infine, nessuno dei processi di tipo chimico risulta attualmente conveniente a causa della complicata gestione dei chemicals coinvolti e del loro smaltimento.

Alla luce di quanto introdotto, riveste un'importanza cruciale l'individuazione di una tecnologia per il recupero e il riciclo dei materiali contenuti nei rifiuti FV che rispetto a quelle convenzionali sia meno energivora, semplice da realizzare e valida per tipologie diverse di moduli, selettiva nel recupero di ciascun materiale con elevato grado di purezza, veloce e con impatto ambientale minimo.



3. Descrizione del progetto

Il piano di lavoro di ECO-PV ed ENEA mira ad incentivare l'uso efficiente ed ecocompatibile delle risorse, con attenzione al recupero, al riciclaggio e all'ottimizzazione del ciclo di vita delle materie prime provenienti dai pannelli fotovoltaici a fine vita.

I ricercatori ENEA e i tecnici di ECO-PV hanno svolto prove sperimentali a livello di laboratorio per la validazione del processo e, contemporaneamente, hanno effettuato uno studio di fattibilità tecnico-economica (atto a verificare la sostenibilità industriale del processo tecnologicamente avanzato individuato, considerando anche l'impatto ambientale ad esso associato) finalizzati alla progettazione e alla realizzazione di un impianto pilota e successivamente industriale per il trattamento dei moduli fotovoltaici a fine vita.

Le attività svolte dai tecnici di ECO-PV e dai ricercatori ENEA presso il Laboratorio "Sistemi Fotovoltaici e Smart Grid" (DTE_FSN-FOSG) del Centro di Ricerca ENEA di Portici (NA), nell'ambito della gestione del fine vita dei moduli FV, sono state indirizzate al raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- offrire alla filiera industriale nazionale una soluzione avanzata per la corretta gestione dei rifiuti derivanti dai moduli FV a fine vita;
- minimizzare il loro impatto ambientale;
- attuare un'alternativa sostenibile da punto di vista ambientale rispetto allo smaltimento dei materiali attualmente conferiti in discarica;
- efficientare dal punto di vista energetico ed ambientale i processi convenzionali attualmente adoperati;
- sviluppare tecnologie avanzate ed innovative per il recupero dei materiali valorizzabili da varie tipologie di moduli FV giunti a fine vita;
- ridurre l'impatto sull'ambiente causato da emissioni e rifiuti secondari derivanti dai processi attuali;
- ridurre il dispendio energetico per il trattamento delle materie prime per la produzione di nuovi prodotti;
- trasferire le tecnologie sviluppate per industrializzare i processi di recupero sostenibili sviluppati.

In particolare, l'obiettivo del progetto è il recupero totale, attraverso trattamenti prevalentemente di natura meccanica, del vetro integro, dell'alluminio, del silicio, dei metalli valorizzabili nonché dei materiali polimerici potenzialmente destinabili per applicazioni nel campo dell'edilizia.

L'obiettivo primario del trattamento meccanico che si intende proporre è l'eliminazione dei polimeri che compongono la struttura del pannello ed il recupero del vetro con un impatto ambientale di processo trascurabile. Il recupero del silicio e dei metalli valorizzabili verrà fatto con trattamenti meccanici successivi anch'essi a basso impatto ambientale e poco energivori rispetto ai trattamenti convenzionali. L'impatto ambientale sarà valutato in termini di distribuzione quali/quantitativa dei prodotti di degradazione e dei residui di processo e l'efficienza del processo sarà valutata in termini di resa dei materiali recuperati e della loro purezza.

L'impatto ambientale dei trattamenti meccanici, inoltre, può considerarsi trascurabile poiché lo strato polimerico posteriore, costituito principalmente da Tedlar, viene rimosso completamente senza essere degradato. In tal modo, gli esausti derivanti dalla combustione del Tedlar, che invece sono



tipici dei processi convenzionali e che contengono composti fluorurati ed acido fluoridrico e che necessitano di particolari sistemi di abbattimento per il trattamento delle specie fluorurate, non vengono prodotti [1, 2].

Di seguito si elencano le fasi dell'attività di ricerca che stanno conducendo ECO-PV ed ENEA. Attualmente è in corso la FASE IV.

– FASE I.

La prima fase ha riguardato la definizione e la pianificazione della mission tra ENEA ed ECO-PV per la realizzazione di una tecnologia innovativa per il recupero dei materiali derivanti da pannelli fotovoltaici a fine vita principalmente mediante metodi di tipo meccanico. Le attività erano mirate all'individuazione di una tecnologia avanzata che consentisse di migliorare il panorama attuale nell'ambito della gestione dei rifiuti FV. Il processo che si propone di sviluppare risulterà pienamente rispondente alle direttive europee sui RAEE, economicamente sostenibile ed a basso impatto ambientale. Nella prima fase della ricerca sono state acquisite le conoscenze necessarie a procedere verso lo sviluppo della tecnologia più efficiente e sostenibile con metodi meccanici innovativi. Contemporaneamente alla valutazione di tale scelta, è stato redatto un business plan di processo.

– FASE II.

Nella seconda fase della ricerca è stato investigato il campo delle tecnologie meccaniche innovative da sperimentare, analizzando a livello tecnico-economico varie possibilità. Inoltre, prove sperimentali sono state condotte per la scelta della tecnologia da sviluppare nelle fasi successive. La valutazione della FASE II è avvenuta, come predetto, in base all'esito del lavoro di laboratorio, associando una verifica di fattibilità economica.

– FASE III.

Nella terza fase della ricerca sono stati studiati i meccanismi di separazione degli altri materiali del modulo FV.

L'obiettivo del progetto è l'individuazione di una nuova tecnologia per il recupero dei materiali provenienti da RAEE FV che massimizzi la resa di recupero. Raggiunti gli obiettivi minimi di recupero sanciti nella Direttiva Europea 2012/19/EU già nella FASE II, ulteriore scopo del lavoro della fase in oggetto, è stato quello di sviluppare la tecnologia limitando le emissioni, nel rispetto e nella salvaguardia dell'ambiente. La valutazione della terza fase è stata effettuata in base al raggiungimento dei targets appena esposti ed ai relativi business plan.

– FASE IV.

Nella quarta fase sarà progettato e realizzato l'impianto pilota per la sperimentazione industriale del processo messo a punto da ECO-PV ed ENEA. I dati raccolti con questo impianto serviranno come verifica e validazione della tecnologia innovativa e verranno utilizzati per la progettazione, con eventuali miglioramenti, dell'impianto industriale definitivo. La valutazione e la verifica per il raggiungimento degli obiettivi preposti sarà effettuata attraverso gli indicatori fisici, cioè valori statistici, numerici e parametri, appositamente individuati per il progetto in questione (essi sono stati utilizzati anche nei vari step di verifica delle altre fasi per convalidare i risultati sperimentali e sono stati esplicitati in fase di presentazione del progetto per il bando "Bando per il cofinanziamento di progetti di ricerca finalizzati allo sviluppo di nuove tecnologie di recupero, riciclaggio e trattamento dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE)").



Per lo sviluppo della tecnologia di recupero materiali proposta verranno valutati i seguenti parametri critici:

1. Efficienza di funzionamento dell'impianto in termini del ciclo di vita degli organismi meccanici deputati all'asportazione dei materiali.
2. Spesa energetica specifica della tecnologia proposta.
3. Valutazione dei tempi caratteristici del processo di recupero.
4. Facilità di esercizio dell'intero processo.
5. Resa in termini di quantità di materiali recuperati rispetto ai moduli trattati.
6. Caratteristiche qualitative/purezza dei materiali recuperati.
7. Impatto ambientale in termini di reflui di processo da trattare o avviare a discarica.

Le specifiche tecniche del trattamento innovativo sviluppato da ECO-PV ed ENEA per il recupero e il riciclo dei materiali costituenti il modulo FV non possono essere esplicitate nel totale dei suoi contenuti per motivi di brevetto in corso, infatti è stata progettata una macchina non standardizzata per eseguire le operazioni di delaminazione in maniera del tutto innovativa. Tale tecnologia è inserita in sequenza ad altre lavorazioni, che prevede di macchinari in serie con tempi di lavorazione del pannello brevissimi.

In particolare, attualmente è in fase di progettazione e autorizzazione un impianto pilota nel quale le prove sperimentali saranno condotte su un **quantitativo di rifiuti provenienti da moduli fotovoltaici a fine vita inferiore a 5 tonnellate al giorno** (come previsto dall'art. 211 del D.Lgs. 152/2006 "T.U. Ambiente"). I materiali ottenuti dalle lavorazioni nell'impianto pilota dovranno essere sottoposti ad analisi strumentali nei laboratori ENEA e/o presso altri partner industriali per la caratterizzazione quali/quantitativa delle varie frazioni e la verifica conseguente del grado di purezza delle materie prime seconde recuperare con il trattamento innovativo, quindi si rende necessaria **la cessazione di qualifica di rifiuto (end-of-waste)** per tali materiali.

I suddetti materiali recuperati, potrebbero essere reimpiegati, a valle della loro analisi chimica, nel modo seguente:

1. Cassetta di giunzione e cavi elettrici. Essi potrebbero essere conferiti direttamente a impianti di trattamento dedicati in cui vengono separati i metalli (rame, alluminio, ecc.) dal polimero per essere recuperati grazie a trattamenti meccanici con separazione densimetrica a secco (oppure verrà implementato un macchinario dedicato presso il nostro sito). I metalli possono essere riciclati destinandoli alle fonderie.
2. Cornice di alluminio. Le cornici dei moduli sono costituite da leghe di alluminio (leghe da trasformazione plastica). Grazie alle loro caratteristiche possono essere riciclate e riutilizzate anche all'interno della stessa filiera produttiva fotovoltaica o comunque conferite presso linee produttive di componenti estrusi. Tale modello di riciclo non richiede modifiche dei processi esistenti, in quanto i produttori di componenti estrusi già utilizzano alluminio secondario proveniente da scarti di processo oppure da rottami a fine vita provenienti da diversi settori applicativi. L'alluminio di rifusione è infatti molto più economico da produrre del metallo elettrolitico. Il termine secondario inoltre serve solo a connotare l'origine del materiale e non la sua qualità: in realtà il metallo grezzo di rifusione è composto da leghe idonee alla produzione di semilavorati di alto livello qualitativo.

3. Vetro. Il riutilizzo del vetro consente di risparmiare materie prime, principalmente sabbia silicea, soda e carbonato di calcio e di ridurre in modo significativo i consumi di energia. Un altro beneficio indotto dal riciclo è la riduzione degli inquinanti presenti nei fumi del forno di fusione. È possibile la vendita del rottame di vetro bianco pregiato direttamente alle vetrerie che, visto, il basso contenuto di metalli, può essere reimpiegato nell'industria alimentare, di produzione di contenitori per farmaci o profumi.
4. Metalli. La quasi totalità dei metalli recuperati è composta da rame (in più bassa percentuale in peso troviamo anche argento, stagno e piombo) il quale può essere rifiuto, come il resto degli altri metalli contenuti nel modulo fotovoltaico, direttamente in fonderia per la formazione di nuovi lingotti.
5. Silicio. Il silicio ottenuto da questo tipo di lavorazione meccanica non possiede più le caratteristiche fotovoltaiche. Quindi potrebbe essere utilizzato per la fabbricazione di altre celle fotovoltaiche solo previa purificazione per acquisire nuovamente il "grado elettronico". L'altra soluzione potrebbe essere quella di vendere il silicio tal quale alle acciaierie per la fabbricazione di acciai al silicio o per la produzione di lamierini magnetici (si tratta di ferro contenente fino al 4,5% di silicio. La presenza del silicio limita fortemente le perdite per correnti di Foucault e ha un effetto stabilizzante nei riguardi delle caratteristiche magnetiche del materiale, per cui tali lamierini vengono detti "magnetici"). Il silicio è un materiale semiconduttore di comune impiego per diodi, transistori, circuiti integrati, microprocessori, memorie RAM e ROM. Un'idea della sua importanza quantitativa si può avere ricordando che oltre il 98% dei dispositivi a semiconduttore fabbricati nel mondo impiegano il silicio come materiale di partenza.
6. Polimeri. La maggior parte dei polimeri costituenti il modulo FV è composto da EVA (Etilen Vinil Acetato) e Tedlar (poli vinil fluoruro), due materiali dalle differenti caratteristiche chimico-fisiche. L'EVA è un polimero fortemente insaturo che, nell'applicazione a caldo (130 °C) nella produzione dei moduli FV, reticola raggiungendo una viscosità sufficiente per legare fra loro tutti i componenti del modulo stesso. L'EVA viene utilizzato poiché presenta in generale ottima resistenza all'aria calda, all'ozono, all'ossigeno e alla luce, bassa deformazione per compressione in un'ampia gamma di temperature, scarso potere rigonfiante, media resistenza agli oli minerali, valori di isolamento elettrico medio. Il rivestimento posteriore in Tedlar è costituito da un polimero semi-cristallino chiamato polivinilfluoruro, ovvero un omopolimero il cui monomero è simile all'etilene, ma è presente un atomo di fluoro al posto di un idrogeno. Esso viene utilizzato nello strato posteriore del modulo FV poiché è un polimero che resiste agli agenti atmosferici e all'invecchiamento. L'EVA e il Tedlar potrebbero essere riutilizzati legandoli insieme a dei collanti (resine) per la produzione di pannelli da utilizzare nei mobilifici, ovvero come isolanti nel campo dell'edilizia.

Bibliografia

- [1] S. Huber, M. Moe, N. Schmidbauer, G. Hansen, D. Herzke, Emissions from the incineration of fluoropolymer materials, 2009.
- [2] J.P.R. Gustavsson, C. Segal, W.R. Dolbier, B. Ameduri, G. Kostov, Combustion and thermal decomposition of fluorinated polymers, Combustion Science and Technology. 178 (2006) 2097–2114. doi:10.1080/00102200600860681.

4. Definizione del gruppo di lavoro, delle mansioni, delle potenzialità e delle competenze di ciascun soggetto per il raggiungimento degli obiettivi del progetto

Nel 2017 è nata la collaborazione scientifica di ricerca tra ECO-PV ed ENEA, sede di Portici (NA) con il gruppo di ricerca guidato dal Dott. Ezio Terzini, Responsabile di Divisione Fotovoltaico e Smart Network del Dipartimento Tecnologie Energetiche (DTE-FSN-FOSG), per l'attuazione del progetto "Progetto per il recupero di materie prime da pannelli fotovoltaici a fine vita".

"L'ENEA è l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, ente di diritto pubblico finalizzato alla ricerca, all'innovazione tecnologica e alla prestazione di servizi avanzati alle imprese, alla pubblica amministrazione e ai cittadini nei settori dell'energia, dell'ambiente e dello sviluppo economico sostenibile", come recita l'art. 4 della Legge 28 dicembre 2015, n. 221. Inoltre:

- l'ENEA detiene un insieme di competenze/conoscenze relative allo sviluppo ed alla fabbricazione di celle e moduli fotovoltaici con tecnologie standard e/o innovative;
- l'ENEA ha sviluppato, a livello di laboratorio, un processo dedicato al recupero dei materiali dai moduli fotovoltaici a fine vita, caratterizzato da un ridotto budget energetico e da un basso impatto ambientale, di cui detiene lo specifico know-how.

Avvalendosi delle conoscenze tecnico-scientifiche dell'ENEA nel campo del fotovoltaico, ECO-PV è interessata ad attrezzare le proprie infrastrutture di trattamento RAEE con impianti innovativi idonei a processare in maniera specifica i moduli fotovoltaici conferiti al Consorzio con la finalità del recupero e del riciclaggio dei relativi materiali costitutivi, in quanto:

- ECO-PV è uno dei principali Consorzi/Sistemi italiani riconosciuti dal GSE ed autorizzati per la gestione dei moduli fotovoltaici a fine vita;
- ECO-PV è il primo consorzio italiano specifico per il settore fotovoltaico e conforme agli obblighi del IV e V Conto energia e già strutturato ai sensi della direttiva RAEE relativa al trattamento e smistamento a fine vita dei rifiuti elettronici;
- ECO-PV possiede anche elevate capacità di progettazione e realizzazione impiantistiche rivolte al settore ambientale.

ECO-PV, ad oggi, si pone come autorevole referente per lo sviluppo di una filiera virtuosa e in continua evoluzione nel settore del trattamento del fine vita dei moduli fotovoltaici, grazie proprio all'attività di ricerca in collaborazione con ENEA. Ai sensi del disciplinare tecnico "Definizione e verifica dei requisiti dei 'Sistemi o Consorzi per il recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita' in attuazione delle 'Regole applicative per il riconoscimento delle tariffe incentivanti' (DM 5 maggio 2011 e DM 5 luglio 2012)" e successivi decreti, ECO-PV:

1. E' in grado di manlevare il Produttore di moduli da responsabilità anche risarcitoria, derivante da violazioni non dolose e/o imputabili a colpa grave delle norme di riferimento per la corretta



gestione dei rifiuti; la manleva è garantita per tutti i Produttori clienti o soci del Sistema/Consorzio nonché per i Produttori che sono e/o sono stati Soci del Sistema/Consorzio;

2. Dispone di una rete di raccolta dei RAEE FV professionali su tutto il territorio nazionale, messa a disposizione da parte di propri partner commerciali autorizzati;
3. Dispone di depositi di stoccaggio autorizzati, messi a disposizione da parte di propri partner commerciali, dove vengano condotti i RAEE FV professionali dopo il loro ritiro e prima del loro conferimento agli impianti di trattamento e recupero finali;
4. Dispone di impianti di trattamento e recupero adeguati, messi a disposizione da parte di propri partner commerciali, presso cui conferire i RAEE FV professionali;
5. Garantisce che almeno il 65% in peso dei moduli gestiti venga avviato a riciclo, che almeno il 75% in peso venga avviato a recupero e sta proseguendo l'attività di ricerca per innalzare tali soglie di recupero e riciclo dei RAEE FV;
6. E' in grado di tracciare i moduli fotovoltaici durante il loro intero ciclo di vita, in modo tale da permettere al GSE le proprie attività di controllo e statistica
7. E' in grado di garantire e finanziare lo svolgimento di tutte le fasi di gestione a fine vita dell'AEE garantito, attraverso il rispetto della normativa vigente in materia di gestione dei rifiuti, per mezzo del proprio TRUST ECO-PV e di tutti i soggetti designati alla sua gestione e controllo, ai sensi del sopraccitato disciplinare tecnico e del successivo D.Lgs. 49/2014;
8. E' in grado di rendicontare le quantità di RAEE FV professionali raccolte (in numero di pezzi ed in peso) e quelle inviate a recupero e riciclo (in peso).

ECO-PV è iscritto all'Albo Nazionale dei Gestori Ambientali nella Categoria 8, lettera f, "Intermediazione e commercio dei rifiuti senza detenzione degli stessi". In virtù della suddetta autorizzazione ECO-PV gestisce regolarmente le attività di ritiro, trasporto e trattamento di RAEE per conto di svariati gestori di impianti fotovoltaici e operatori O&M conosciuti e prestigiosi. ECO-PV ha vinto il bando di gara N. 0000001658 indetto da Enel Green Power Spa per il "servizio di raccolta, trasporto, smaltimento/recupero rifiuti presso impianti FV perimetro Italia", a testimonianza della riconosciuta qualità ed efficienza dei servizi forniti da ECO-PV, il bando emanato dal MATTM nel 2018 "Bando per il cofinanziamento di progetti di ricerca finalizzati allo sviluppo di nuove tecnologie di recupero, riciclaggio e trattamento dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE)" e, sempre nel 2018, il bando "Proof of Concept" emanato dall'ENEA stessa per una proposta progettuale finalizzata alla realizzazione di una tecnologia con un grado di maturità tecnologica misurabile nella scala TRL (Technology Readiness Level che va da 1 a 9) pari a 4, con l'obiettivo di trasferire i risultati dalla ricerca maturati in laboratorio all'industria e renderli commercializzabili.

Per questo progetto e per altre attività di ricerca in corso, ECO-PV può contare anche sulla consulenza tecnico-scientifica dell'Ing. Mauro Vignolini, ex. Direttore dell'Unità Tecnica Fonti Rinnovabili del centro di ricerca ENEA Casaccia (RM).



L'attività dell'ENEA nell'ambito del progetto è stata mirata allo studio, alla progettazione ed all'attuazione di prove sperimentali su scala pilota volte a dimostrare la fattibilità della tecnologia per il recupero dei materiali dai pannelli a fine vita. In particolare, le attività prevedono la realizzazione di un prototipo per prepararne la commercializzazione, la verifica della fattibilità commerciale e test per lo scale up industriale.

ENEA dispone di personale altamente qualificato, laboratori avanzati, impianti sperimentali e strumentazioni di eccellenza per la realizzazione di progetti, studi, prove, valutazioni, analisi e servizi di formazione con particolare riferimento all'innovazione di prodotto e di processo e alla valorizzazione dei risultati per contribuire allo sviluppo e alla competitività del Sistema Paese.

Sin dalla nascita negli anni '60, i suoi punti di forza sono la ricerca applicata, il trasferimento tecnologico e l'assistenza tecnico-scientifica a imprese, associazioni, territori, amministrazioni centrali e locali: anche per questo, diversamente da altri enti di ricerca, il riferimento istituzionale è il Ministero dello Sviluppo economico.

Alcuni dei settori di specializzazione riguardano le tecnologie energetiche (fonti rinnovabili, accumuli, reti intelligenti) nell'ambito dei quali l'ENEA è anche il coordinatore del Cluster Tecnologico Nazionale Energia, la fusione nucleare e la sicurezza (dove l'Agenzia è coordinatore nazionale per la ricerca), l'efficienza energetica, le tecnologie per il patrimonio culturale, la protezione sismica, la sicurezza alimentare, l'inquinamento, le scienze della vita, le materie prime strategiche, il cambiamento climatico. Fra i temi emergenti anche l'economia circolare che vede ENEA candidata ad Agenzia Nazionale per l'uso efficiente delle risorse e la mobilità sostenibile.

Per rafforzare le sue attività, ENEA collabora con numerosi enti e istituzioni di ricerca nazionali e internazionali quali Texas Tech University, Stanford Research Institute, New Delhi University, l'Accademia delle Scienze cinese, ICTP, TWAS, e partecipa a piattaforme tecnologiche e network quali [EERA](#) (European Energy Research Alliance), [ECRA](#) ([European Climate Research Alliance](#)), [MEDENER](#) ed [Enterprise Europe Network](#), la più grande rete di servizi a sostegno della competitività e dell'innovazione per le PMI.

5. Obiettivi di recupero attualmente raggiunti da ECO-PV ed ENEA

Ad oggi, le attività condotte da Enea ed Eco-PV sono state focalizzate sull'individuazione di trattamenti che consentano la delaminazione dei vari strati di cui è costituita la struttura di un modulo, mediante operazioni meccaniche. Test in scala di laboratorio hanno consentito di verificare la possibilità di recuperare, oltre al vetro e l'alluminio, anche le plastiche e materiali metallici che possono essere reinseriti in nuovi processi produttivi.

Le prove sperimentali di delaminazione sono risultate molto interessanti per la loro efficienza, velocità, economicità e sostenibilità ambientale.

Le prove sperimentali effettuate per sondare l'efficacia dei trattamenti meccanici scelti per il recupero di materiali dai rifiuti fotovoltaici hanno evidenziato alcuni aspetti tecnici che Enea ed Eco-PV stanno attualmente affrontando e che verranno ottimizzate all'interno dell'impianto pilota oramai in fase di progettazione e realizzazione.

Intanto, sono state effettuate prove preliminari su macchine standard che hanno permesso di raggiungere i seguenti risultati:

- Recupero del 100% della cornice di alluminio e della cassetta di giunzione;
- Recupero del 100% del vetro del modulo FV con elevato grado di purezza;
- Separazione meccanica delle frazioni di materiali che compongono il tappetino;
- Recupero dei metalli presenti nelle celle FV puri al 99% in peso.

Per questi ultimi, nei laboratori ENEA di Portici (NA), sono state effettuate analisi chimiche di caratterizzazione quali-quantitativa dei campioni metallici che ne hanno determinato la purezza.

Le frazioni metalliche ottenute dalle prove sperimentali sono mostrate nelle immagini seguenti.



Figura 2. Frazione metallica ≥ 2 mm



Figura 3. Frazione metallica 2 -1 mm



Figura 4. Frazione metallica 1 - 0.5 mm



Figura 5. Preparazione del campione di metalli per l'analisi chimica

L'ottenimento delle frazioni metalliche è accompagnato da una frazione di scarto costituita prevalentemente da polimeri che attualmente è in fase di studio.

In Tabella 2 sono riportati i risultati delle analisi effettuate dai tecnici ENEA per la determinazione del contenuto di Carbonio nelle frazioni metalliche. Le analisi strumentali sono state effettuate mediante un analizzatore Elementar modello Inductar CS e sono relative alla percentuale in peso di carbonio contenuto in ciascuna frazione.

Campione	C (%wt) \pm abs. dev.	Polimeri (%wt)
Fraz. Metal. \geq 2 mm	0.10430 \pm 0.00783	0.1477
Fraz. Metal. 2 - 1 mm	0.11043 \pm 0.00835	0.1564
Fraz. Metal. 1 – 0.5 mm	0.09073 \pm 0.01311	0.1285
Fraz. Metal. \leq 0.5 mm	0.53122 \pm 0.00756	0.7524

Tabella 2. Analisi ENEA: Contenuto di carbonio nelle varie frazioni



Dall'analisi delle varie frazioni metalliche recuperate con il processo di separazione innovativo di ECO-PV ed ENEA, si evince che il loro contenuto di polimeri è al di sotto dell'1%. In particolare, le frazioni di metalli con grani di misura superiore a 0.5 mm risultano tutte pure al 99,9% in peso. Solamente nella frazione inferiore alla suddetta, si rileva una percentuale di poco superiore di polimeri, ma comunque inferiore all'1% (metalli puri al 99,2% in peso).



6. Conclusioni

Come illustrato nella presente relazione tecnica, nel 2017 **ECO-PV** e l'Agenzia Nazionale **ENEA** iniziano una collaborazione scientifica che ha come obiettivo l'industrializzazione di un processo innovativo per il trattamento dei moduli fotovoltaici a fine vita finalizzato al recupero, il più **efficiente ed ecosostenibile** possibile, delle materie prime seconde.

A tal proposito, ECO-PV ed ENEA sono risultati vincitori di due bandi pubblici, uno indetto dal **Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare** e uno indetto dall'**Enea** stessa.

La nostra attività di ricerca ha permesso di sviluppare un processo innovativo in cui l'efficienza di recupero dei materiali è elevatissima e rivoluziona il settore del recupero del modulo fotovoltaico. Inoltre, questo tipo di trattamento risulta **più efficiente** da un punto di vista energetico rispetto agli altri in uso, **completamente ecosostenibile** essendo a **emissioni zero** e in grado di recuperare materie prime secondarie con **elevato grado di purezza**, tali da consentirne il riciclo per la produzione di nuovi prodotti.

Infatti, le più importanti caratteristiche sono:

- riduzione del fabbisogno energetico del processo di trattamento
- zero emissioni di inquinanti
- recupero dei materiali con elevato grado di purezza.

Nell'ottica dell'**economia circolare** e dell'**end-of-waste**, ECO-PV intende massimizzare il recupero e il riciclo dei materiali costitutivi dei rifiuti fotovoltaici.

La collaborazione con ENEA ha consentito ad ECO-PV di raggiungere un importante traguardo e certifica l'**ottima qualità** sia della stretta collaborazione che dei contenuti tecnico-scientifici delle attività svolte dai due team.

Attualmente, con il nostro processo innovativo sperimentato in laboratorio, siamo in grado di recuperare il 100% della cornice di alluminio e della lastra di vetro del modulo FV, con grado di purezza massima, separiamo inoltre i metalli con un grado di purezza pari al 99% in peso (risultato certificato da Enea) e stiamo lavorando al recupero delle plastiche.

Infine, stiamo iniziando l'iter autorizzativo per un sito destinato ad accogliere il prototipo che permetterà di validare il processo innovativo su ampia scala e successivamente di implementarlo nell'impianto industriale definitivo.

L'attività di ricerca che abbiamo condotto ha prodotto ottimi risultati ma una normativa adeguata che legalizzi il settore del recupero dei moduli fotovoltaici attiverrebbe la filiera dell'economia circolare.