



**MISSION
INNOVATION**

accelerating the clean energy revolution

POA MATERIALI AVANZATI PER L'ENERGIA

**PROGETTO IEMAP - Piattaforma Italiana Accelerata per i Materiali per
l'Energia**

DESCRIZIONE PROTOTIPO PER IL TRATTAMENTO DEI
PANNELLI A FINE VITA IN SILICIO CRISTALLINO E
FINALIZZATO AL RECUPERO DEI MATERIALI

M. Tamaro, L. M. Cafiero, C. Tebano, L. Tuccinardi, R. Tuffi



D4.5, DESCRIZIONE PROTOTIPO PER IL TRATTAMENTO DEI PANNELLI A FINE VITA IN SILICIO CRISTALLINO E FINALIZZATO AL RECUPERO DEI MATERIALI

M. Tammaro, L. M. Cafiero, C. Tebano, L. Tuccinardi, R. Tuffi (ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile - Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali. C.R. Casaccia, Via Anguillarese 301, 00123, Roma)

Maggio 2023

Report MISSION INNOVATION

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica – ENEA

Mission Innovation 2021-2024 - II annualità

Progetto: IEMAP

Work package: Materiali per fotovoltaico

Linea di attività: LA4.4, Riciclo materiali dai pannelli a fine vita. Realizzazione prototipo da laboratorio e definizione di un processo di trattamento sostenibile dei pannelli finalizzato al recupero dei materiali

Responsabile del Progetto: Massimo Celino (ENEA)

Responsabile della LA: Marco Tammaro (ENEA)

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
1.1 INQUADRAMENTO NORMATIVO	5
1.2 MERCATO GLOBALE DEI PANNELLI FOTOVOLTAICI	5
1.3 TECNOLOGIE DI RICICLO DEI PANNELLI FOTOVOLTAICI	6
1.3.1 <i>Processi su scala industriale</i>	6
1.3.2 <i>Rassegna dei principali brevetti</i>	6
1.4 ESAME DELLA TECNOLOGIA TRADIZIONALE	7
1.5 SCOPO E PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL PROTOTIPO	7
1.6 DESCRIZIONE DEL PROCESSO	8
1.6.1 <i>Principali vantaggi offerti dal processo proposto</i>	9
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	10
2.1 DESCRIZIONE DEL PROTOTIPO	10
3 DESCRIZIONE DELLE OPERAZIONI PROPEDEUTICHE ALLA SEPARAZIONE DELLE COMPONENTI	12
3.1 PREPARAZIONE DEL PANNELLO	13
3.2 DESCRIZIONE DELLA PROVA DI RIMOZIONE DEL BACKSHEET E DELLO STRATO DI EVA	13
4 CONCLUSIONI	15
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	16
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	17

Sommario

La presente relazione offre una descrizione tecnica di un'apparecchiatura per il riciclo di pannelli fotovoltaici a fine vita. Il suo principio di funzionamento si basa sul brevetto italiano n. 102017000033488, concesso il 10-07-2019 dal titolo "Metodo a basso consumo energetico e a basso impatto ambientale per il recupero dei componenti principali dei pannelli fotovoltaici in silicio cristallino a fine vita", di proprietà ENEA e Beta-tech S.r.l in pari percentuale (50 %). L'apparecchiatura è stata realizzata e installata presso i laboratori del C.R. ENEA Casaccia di Roma nell'ambito delle attività previste dalla **LA 4.4 "Riciclo materiali dai pannelli a fine vita. Realizzazione prototipo da laboratorio e definizione di un processo di trattamento sostenibile dei pannelli finalizzato al recupero dei materiali. WP4 "Materiali per fotovoltaico"** del progetto IEMAP. Il documento fornisce informazioni riguardo a: 1) le parti funzionali; 2) le modalità in cui si svolge una prova di separazione delle componenti recuperabili 3) un confronto con lo stato di sviluppo tecnologico raggiunto a livello industriale dal riciclo di pannelli fotovoltaici 4) dati sulla produzione e il fine vita di pannelli a livello nazionale e tra i maggiori paesi industrializzati. L'apparecchiatura opera con un sistema semi-automatico la separazione degli strati polimerici del pannello fotovoltaico consentendo il successivo recupero dei seguenti materiali il backsheet, lo strato di etilen vinil acetato (EVA), celle di silicio cristallino ed i contatti elettrici. Rispetto ai metodi conosciuti e disponibili sul mercato, il prototipo sviluppato nel progetto opera con consumi energetici ed emissioni gassose ridotte e permette il recupero anche dei diversi strati di polimero (backsheet ed EVA) per il successivo potenziale riciclo. Nel presente rapporto viene inoltre descritta una prova sperimentale tipo corredata dal monitoraggio delle emissioni diffuse al fine di validare l'efficacia del sistema del loro contenimento.

1 Introduzione

Nel presente documento si descrive il lavoro svolto nell'ambito della LA 4.4 del WP 4, e relativi risultati finali.

1.1 Inquadramento normativo

La Direttiva 2012/19/UE (modificata dalla Direttiva 2018/849/UE), recepita in Italia dal Dlgs 49/2014 e s.m.i., ha per la prima volta inserito i pannelli fotovoltaici a fine vita nell'elenco dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE), e ne ha imposto il recupero dei materiali che li compongono fino all'85 % in peso. Tale percentuale, per i pannelli in silicio cristallino, si raggiunge anche con il solo recupero del vetro e della cornice in alluminio. Infatti, un modulo fotovoltaico in silicio cristallino è costituito tipicamente da vetro per circa il 70% del suo peso, da alluminio per il 15%, da silicio per il 4 %, da EVA per circa il 7 % e da altri materiali (4 %), tra cui argento, stagno, rame, impiegati per la realizzazione dei contatti elettrici e nelle paste saldanti.

1.2 Mercato globale dei pannelli fotovoltaici

L'impiego di pannelli fotovoltaici è in costante crescita sin dai primi anni 2000. Alla fine del 2015 secondo il rapporto IRENA la capacità globale ha raggiunto 222 gigawatts (GW) e si prevede che raggiunga la soglia dei 4500 GW entro il 2050. Dati cumulativi particolarmente elevati sono attesi in Cina (1,731 GW), India (600 GW), Stati Uniti (600 GW), Giappone (350 GW) e Germania (110 GW).

Nel 2022 l'Italia ha superato i 25 GW di potenza fotovoltaica installata. Sono oltre 1.220.000 gli impianti installati, dei quali l'87% di taglia inferiore ai 12 kW, tipica degli impianti di tipo residenziale. La potenza connessa nel 2022 ammonta a 2,48 GW, con un aumento del 164% rispetto al 2021 [1]. L'età media dei pannelli installati è tra gli 11 e i 13 anni, con una perdita di potenza di circa 1%/anno.

Al crescere del mercato dei pannelli, è ovviamente prevista una crescita proporzionale dei pannelli a fine vita. Alla fine del 2016 si stimava una quantità globale fino a 250 mila tonnellate, che corrisponde a circa lo 0,6% del peso dei pannelli installati. Se si considera una vita media del pannello intorno ai 30 anni, si prevede che nel 2030 il 4% della produzione di quell'anno corrisponderà al quantitativo da trattare.

Si ricorda che nel 2014 la produzione globale di RAEE ha raggiunto la cifra record di 41,8 milioni di tonnellate e che la produzione annua di rifiuti da pannelli fotovoltaici nello stesso anno è stata di circa 400 mila tonnellate. Con il ritmo di crescita annuale, per il 2050, i rifiuti da pannello fotovoltaico possono superare il 10% della produzione globale di RAEE raggiunta nel 2014.

1.3 Tecnologie di riciclo dei pannelli fotovoltaici

1.3.1 Processi su scala industriale

Lo scopo principale dei processi di riciclaggio dei pannelli in silicio cristallino è quello di eliminare lo strato di EVA, così da poter slegare i materiali che compongono gli altri strati, tra cui il vetro. La cornice di alluminio può essere rimossa solo meccanicamente, sia manualmente che in maniera automatizzata.

I metodi attualmente adottati per trattare pannelli in silicio cristallino si possono suddividere schematicamente in due categorie: termico e meccanico. In entrambi i casi possono essere seguiti da trattamenti chimici e/o fisici (setacciatura, separazione gravimetrica, etc.) di finitura per l'eventuale recupero di altri materiali (silicio, rame, argento, etc.).

Nei trattamenti termici convenzionali si procede con un riscaldamento tra i 500 e i 600 °C, solitamente all'interno di fornaci con o senza atmosfera controllata, per la degradazione completa dello strato di EVA. La durata del processo dipende dalla velocità di riscaldamento, ma è generalmente nell'ordine di 30-60 min. Alla fine si possono recuperare lo strato di vetro e le celle, oltre ai contatti elettrici. Le celle recuperate possono essere sottoposte a trattamenti chimici [2] e/o meccanici per il recupero di silicio e/o altri metalli preziosi (argento, rame ed alluminio)

I processi meccanici consistono in una frantumazione, in genere suddivisa in due step, grossolana e fine, che ha lo scopo di ridurre la superficie di contatto vetro-EVA-cella, e quindi facilitarne il distacco con i successivi trattamenti fisici. I processi di frantumazione, alla fine dei due step, generalmente consentono di recuperare circa l'80% del vetro. Alla fine del processo di finitura, quindi con ulteriori trattamenti termici e/o chimici, si possono raggiungere elevate percentuali di recupero (circa il 95%).

1.3.2 Rassegna dei principali brevetti

Accanto alla tecnologia sviluppata in scala industriale, si possono menzionare metodi emersi da un'indagine su alcuni brevetti che mirano a raggiungere minori impatti.

Nel brevetto US6063995 [3] la separazione dei componenti principali che costituiscono il modulo fotovoltaico avviene mediante un processo di riscaldamento fino alla fusione della componente polimerica (EVA). Il processo di riscaldamento avviene in atmosfera inerte ed in due step, con temperature fino a 540 °C. I prodotti della decomposizione gassosa degli strati polimerici sono successivamente bruciati all'interno di un postcombustore.

Un altro processo è descritto nel brevetto US6129779 [4] Tale processo prevede la frantumazione del pannello e successivo trattamento dei frammenti in un bagno di soluzione acida. La soluzione così ottenuta viene separata dai frammenti solidi e trattata con un agente precipitante che permette il recupero dei metalli.

Nel processo descritto nel brevetto WO2014141311 [5], il principio di funzionamento sfrutta le proprietà fisiche dei materiali che presentano espansione termiche differenti. In particolare, sfrutta un processo di delaminazione criogenica termomeccanica, eventualmente associata ad una vibrazione meccanica simultanea.

Nel processo descritto nel brevetto CN105312303 [6] gli strati di materiale che compongono il pannello sono separati tramite l'uso di un filo o una lama rotante riscaldata. La lama, o il filo, tagliano il pannello longitudinalmente lungo lo strato di EVA, causando il distacco dei singoli componenti. I pannelli vengono preriscaldati.

1.4 Esame della tecnologia tradizionale

Nei metodi sopra descritti, oltre ai punti di forza, sono presenti diverse criticità, di seguito analizzate.

Per i processi che si basano sulla frantumazione, questi richiedono un grande dispendio di energia, in quanto si possono ottenere risultati apprezzabili (recupero di circa il 95 % del vetro) solo dopo almeno due step di frantumazione (grossolana e fine), allo scopo di raggiungere un mesh il più piccolo possibile. Inoltre, comportano anche un dispendio di materiali, in quanto i martelli ed i coltelli utilizzati per la frantumazione presentano elevati gradi di consumo, essendo il vetro ed il silicio materiali con un elevato grado di durezza. Inoltre, per la degradazione completa dell'EVA, possono essere necessari ulteriori trattamenti, ad esempio di tipo chimico. In ogni caso alla fine sono richiesti trattamenti meccanici di separazione (setacciatura, separazione gravimetrica, etc).

Per i processi che si basano sul processo termico:

- comportano la degradazione totale degli strati polimerici con notevole aumento di emissioni gassose pericolose;
- richiedono elevate potenze per metro quadrato trattato;
- processi di difficile realizzazione in modalità continua;
- richiedono un apparato di trattamento fumi non banale.

1.5 Scopo e principio di funzionamento del prototipo

L'apparecchiatura che è stata sviluppata con la **LA 4.4 "Riciclo materiali dai pannelli a fine vita" nell'ambito del WP4 "Materiali per fotovoltaico"** e descritta nel presente documento, mette in atto un processo alternativo ai metodi tradizionali fin qui esposti, rispetto ai quali offre i seguenti vantaggi: 1) economicità legata a bassi consumi energetici; 2) basso impatto ambientale in quanto legato alle sole emissioni gassose diffuse; 3) maggiore recupero di materia, compreso il backsheet e l'EVA. Si ricorda che il backsheet può essere composto da diversi polimeri, quali PVF (polivinilfluoruro) e PET (polietilentereftalato).

Il processo, oggetto del brevetto italiano n. 102017000033488 e concesso il 10-07-2019 [7], si basa su un riscaldamento controllato al fine di provocare il rammollimento degli strati polimerici ed il conseguente distacco di tutti gli strati di materiali di cui è composto il pannello. L'apparecchiatura è stata realizzata in un unico esemplare che nel seguito del documento è indicato come "prototipo".

1.6 Descrizione del processo

Il processo consiste in un metodo per recuperare i componenti principali del pannello fotovoltaico (PFV) in silicio cristallino (c-Si) mediante un trattamento termico a basso consumo energetico e a basso impatto ambientale.

Il modulo fotovoltaico (FV) c-Si ha una struttura a strati costituiti da:

- uno strato di vetro che funge da protezione meccanica anteriore;
- un sottile strato di materiale polimerico, l'EVA;
- celle di silicio e contatti elettrici in metallo;
- un secondo strato di EVA;
- una superficie posteriore di supporto, il backsheet ;

Il tutto è racchiuso da una cornice in alluminio.

I suddetti materiali hanno un ciclo di vita superiore a quello dei dispositivi fotovoltaici, che durano mediamente 25 anni, e pertanto possono essere recuperati in vista di un loro ulteriore utilizzo, nella produzione di nuovi moduli o di altri prodotti.

Il processo propone un metodo che si basa su una alterazione parziale e temporanea della capacità adesiva dello strato di EVA attraverso un trattamento termico "light", e quindi la conseguente separazione dei diversi componenti. Il calore viene prodotto da una fonte di radiazione infrarossa (IR) posta a pochi centimetri di distanza dalla superficie del pannello. Ottimizzando i tempi di esposizione e la distanza tra la fonte IR e la superficie del pannello, si può ottenere una degradazione termica minima e solo laddove serve, cioè lungo gli strati superficiali dell'EVA, ovvero quelli di contatto con gli altri componenti, che quindi possono essere separati. In questo modo si possono recuperare il backsheet, l'EVA, i contatti elettrici in metallo, le celle in silicio ed il vetro. Inoltre, non procedendo alla degradazione di tutto lo strato di EVA, a differenza dei metodi tradizionali basati su trattamenti termici, le emissioni gassose in atmosfera sono molto più contenute.

Scopo della sperimentazione futura sarà quindi di ottenere informazioni esaustive sul ruolo rivestito dai suddetti parametri (frequenza IR, tempi di esposizione, la distanza tra la fonte IR e la superficie del pannello), al fine della loro ottimizzazione sotto il profilo tecnologico, economico ed ambientale.

Riassumendo, il processo proposto consiste in un metodo per separare e recuperare i componenti principali (vetro, EVA, backsheet, celle, contatti elettrici) del pannello fotovoltaico a fine vita mediante un trattamento termico a basso consumo energetico e a basso impatto ambientale. I suddetti componenti sono legati attraverso lo strato di EVA, che funge da collante, in una tipica struttura a strati (vedi Figura 1).

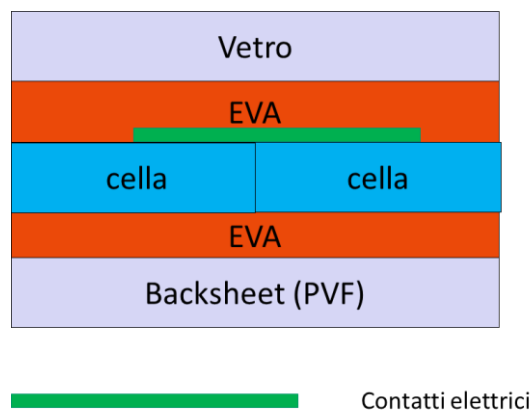


Figura 1– Tipica struttura a strati di un pannello a silicio cristallino

Nel processo proposto, il calore necessario per degradare lo strato di EVA, viene prodotto da una fonte IR, quindi nel range di lunghezze d'onda [0.7 – 1000] μm , posta a pochi centimetri di distanza dalla superficie del vetro anteriore del pannello e/o dalla parte posteriore, posizionato in piano. In questo modo, ottimizzando il parametro tempo e la distanza tra la fonte di calore e la superficie, si può ottenere una degradazione termica solo dove è necessaria. La separazione degli strati di backsheet e di EVA deve poter avvenire mediante un sistema a strappo dei diversi strati. Dopodiché, continuando con il trattamento termico, si possono recuperare i contatti elettrici e le celle, quindi il 100 % del vetro.

1.6.1 Principali vantaggi offerti dal processo proposto

Il processo proposto, alla base del quale vi è la realizzazione del prototipo, si basa sul rammollimento controllato degli strati polimerici, realizzato tramite il riscaldamento del pannello fotovoltaico, e successivo scollamento "a strappo", ottenendo così la separazione dei diversi componenti. Il riscaldamento del pannello può essere di tipo tradizionale radiante-convettivo o a raggi infrarossi. Il riscaldamento tradizionale usa l'aria o altri gas, come mezzo vettore per il trasferimento del calore, con notevole dispersione di calore. Invece i raggi infrarossi interagiscono direttamente con i solidi irraggiati provocandone l'aumento di temperatura. Infatti, le onde elettromagnetiche emesse dai dispositivi a raggi infrarossi vengono assorbite dai corpi irraggiati e ne provocano l'aumento di temperatura. La capacità di assorbimento degli infrarossi degli strati componenti il pannello fotovoltaico rendono particolarmente efficace questa nuova tecnica, in quanto consente di riscaldare i suddetti strati e di rammollire, in maniera controllata, gli strati polimerici, in modo da favorirne il successivo distacco. Ottimizzando il parametro tempo, la potenza della fonte di infrarossi e la distanza tra la fonte di infrarossi e la superficie del pannello, si può facilmente ottenere un rammollimento, per azione termica, degli strati polimerici (backsheet ed EVA), lungo le superfici di contatto con gli altri elementi (vetro e celle in silicio). In questo modo, inoltre, si impedisce di riscaldare troppo i materiali o, peggio, di doverli degradare totalmente, e così si evita un inutile dispendio di energia e si riducono sensibilmente pericolose emissioni gassose, come invece succede nei tradizionali processi termici. Con la presente metodica, la rimozione dello strato di backsheet può avvenire in maniera agevole tramite un'azione "a strappo" permettendo successivamente di recuperare l'EVA, i contatti elettrici, le celle ed il 100

% del vetro. Infine, la modalità di adduzione del calore tramite irraggiamento di infrarossi ben si presta alla realizzazione di un processo in modalità continua.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Descrizione del prototipo

Il prototipo visibile dalla fotografia di Figura 1, si può suddividere schematicamente nelle seguenti unità funzionali:

Struttura portante

- Telaio meccanico rettangolare in alluminio, sorretto da quattro sostegni posti ai vertici, per collocazione orizzontale di un pannello fotovoltaico intero, dotato di sistema di fissaggio del pannello. Il pannello viene posizionato con il lato vetro rivolto verso il basso ed il lato backsheet rivolto verso l'alto.
- Sul telaio sono montati i sistemi di riscaldamento e di strappo descritti nel seguito;
- Piano di raccolta residui solidi, rimovibile, posto sotto il piano di appoggio del pannello e dotato di bordo.

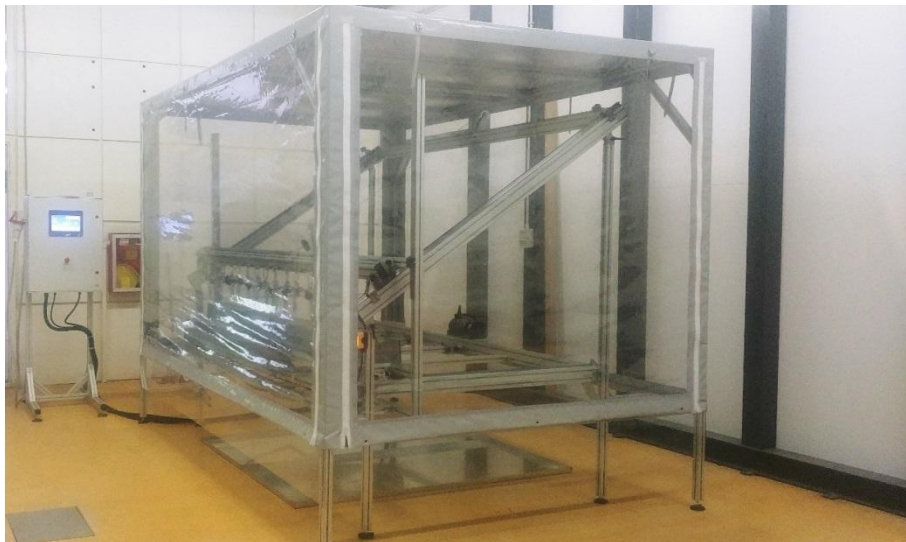


Figura 2– Immagine del prototipo per il riciclo di pannelli fotovoltaici

Unità riscaldamento del pannello

Il sistema di riscaldamento mobile ha lo scopo di promuovere il distacco del backsheet ad una temperatura compresa tra 100 e 150°C e si articola nelle seguenti componenti:

- 24 radiatori ad infrarossi, ad onde corte della lunghezza di 4000 μ m (IRC), disposti in: 1) una fila di 12 elementi al di sopra del piano di appoggio del pannello e rivolti verso il basso, e 2) una fila di 12 elementi al di sotto del piano di appoggio del pannello e rivolti verso l'alto. Ciascun radiatore

assorbe una potenza di assorbimento di 500 W; i radiatori sono rimovibili e regolabili riguardo alla loro posizione e inclinazione;

- Misuratore della temperatura mediante termocamera montata sul telaio. La termocamera rileva la temperatura del segmento di superficie del backsheet interessato dal riscaldamento dei radiatori; la lettura viene effettuata sul pannello di comando; non appena viene raggiunto un valore stabilito (compreso tra 100 e 150°C), entra in azione il motore al quale è collegato il tirante con le morse di afferraggio del backsheet

Unità strappo degli strati polimerici

Questa unità ha il compito di provocare il distacco meccanico del backsheet e si articola nelle seguenti componenti:

1. 12 pinze di afferraggio del lembo del lato lungo del backsheet, precedentemente sollevato come verrà descritto nel seguito; le pinze sono regolabili in numero e in posizione;
2. trave scorrevole su un piano a 45° rispetto all'orizzontale sul quale sono montate le pinze di afferraggio;
3. Sistema di trascinamento costituita da un tirante che provoca lo scorrimento della guida metallica sulla quale sono montate le pinze di afferraggio; il sistema di trascinamento entra in azione non appena viene raggiunta sulla superficie interessata del backsheet la temperatura di setpoint impostata dall'operatore; l'azione di trascinamento è limitata ad un intervallo di tempo prefissato di pochi secondi, mentre la forza di trascinamento del motore dipende dalla resistenza incontrata; il fine corsa è regolabile sulla base del lato breve del pannello;
4. Elementi metallici provvisti di lama tagliente ("raschiatoi"), regolabili in numero, posizione e inclinazione per la rimozione dello strato di etilen-vinil-acetato (EVA), vengono montati sulla guida inclinata dopo che il backsheet è stato rimosso. Anche in questo caso, i radiatori IR provvedono a riscaldare la superficie sulla quale è adeso l'EVA;
5. Rulli, elementi cilindrici in metallo a contrasto dell'azione di sollevamento provocata dalla coppia tirante-motore sulla lastra delle celle in vetro del pannello

Unità di controllo

L'unità di comando e controllo ha il compito di permettere l'impostazione – da parte dell'operatore – dei principali parametri operativi per il funzionamento automatico del prototipo.

E' costituita da un quadro elettrico che assorbe una potenza nominale di 15 kW (32 A), provvisto di schermo "touch screen". Lo schermo mostra i seguenti parametri e indicatori di misura: temperatura della superficie del pannello rilevata dalla termocamera, durata temporale dell'azione di trascinamento, frequenza di alimentazione del motore. Tramite il pannello è possibile impostare la modalità manuale o automatica. Quando si imposta la modalità automatica, è sufficiente stabilire una volta sola, la temperatura di setpoint, la durata del trascinamento e la frequenza di assorbimento del motore. Quando si sceglie la modalità manuale, l'azione di trascinamento del motore dipenderà solo dalla frequenza fissata, ma non agirà in retroazione sulla base della temperatura rilevata, e inoltre continuerà ad agire per tutto il tempo che stabilirà l'operatore.

Unità di contenimento e monitoraggio emissioni diffuse

Sistema di contenimento e monitoraggio delle emissioni diffuse.

Il sistema consiste di una copertura costituita da telone in polivinilcloruro (PVC), con i quattro lati apribili, collegato al sistema di aspirazione costituito da linea aerea, elettroaspiratore e cassone filtrante.

Il cassone filtrante ospita una batteria di piastre di carbone attivo.

Le emissioni sono provocate dal riscaldamento degli strati di backsheet e EVA a temperature comprese in un intervallo tra 100 e 150 °C. Alle temperature indicate, come è possibile osservare esaminando esempi presi dalla letteratura dei rispettivi diagrammi termogravimetrici riportati in Figura 3, non vi è evidenza di fenomeni di decomposizione; pertanto, si tratta di valutare emissioni di sostanze volatili, con concentrazioni in traccia dell'ordine dei PPb mediante analizzatore a ionizzazione di fiamma (PID). Si prevede pertanto di effettuare campagne di misura contestualmente alle prove previste di separazione di backsheet e EVA.

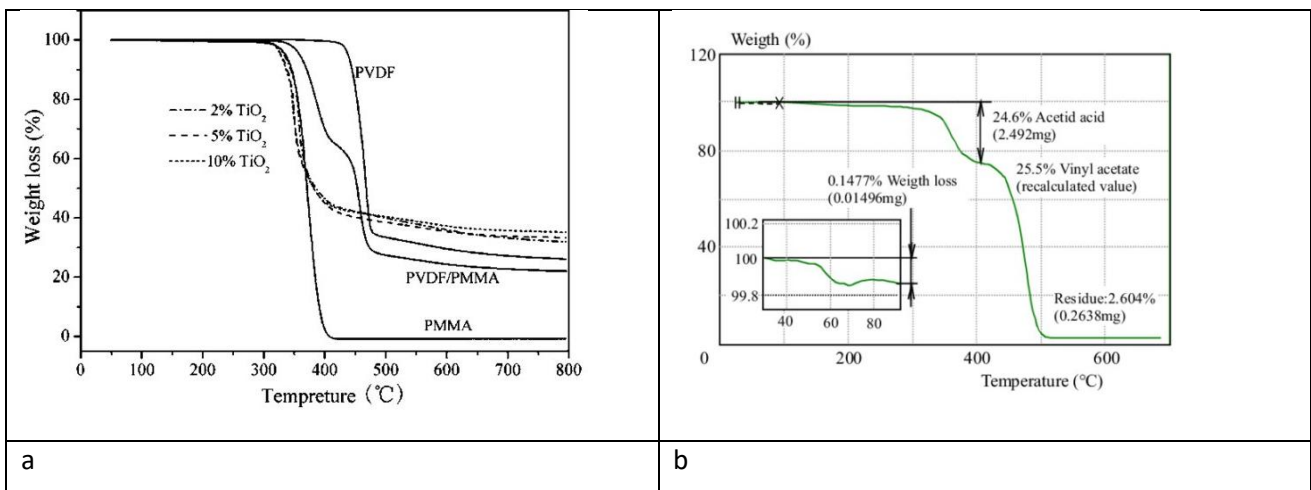


Figura 3–Termogravimetria di strato di (a) backsheet [8] in PVF e di (b) EVA [9]

Ci si avvarrà di uno strumento portatile per la misura dei VOC (volatili organic compounds) nel loro complesso, marca Ion Science, modello Tiger ppb, in grado di misurare un intervallo di concentrazione compreso tra 1 ppb e 20.000 ppm per oltre 480 specie.

3 Descrizione delle operazioni propedeutiche alla separazione delle componenti

A titolo di esempio si riporta la descrizione delle operazioni che seguono su un PVF. L'attività sperimentale si articola nelle due fasi seguenti:

1. Preparazione e disassemblamento manuale della cornice e della junction box
2. Operazioni di rimozione e recupero degli strati di di backsheet e di EVA tramite prototipo

3.1 Preparazione del pannello

Il pannello, le cui dimensioni sono riportate schematicamente nello sketch di Figura 4, viene posizionato su un bancone, con la faccia delle celle rivolta verso il basso, in posizione angolare, in modo che il lato lungo sia parallelo al lato lungo del bancone e fissato con morsetti e muraletti in legno per aumentarne l'aderenza e impedirne il movimento.

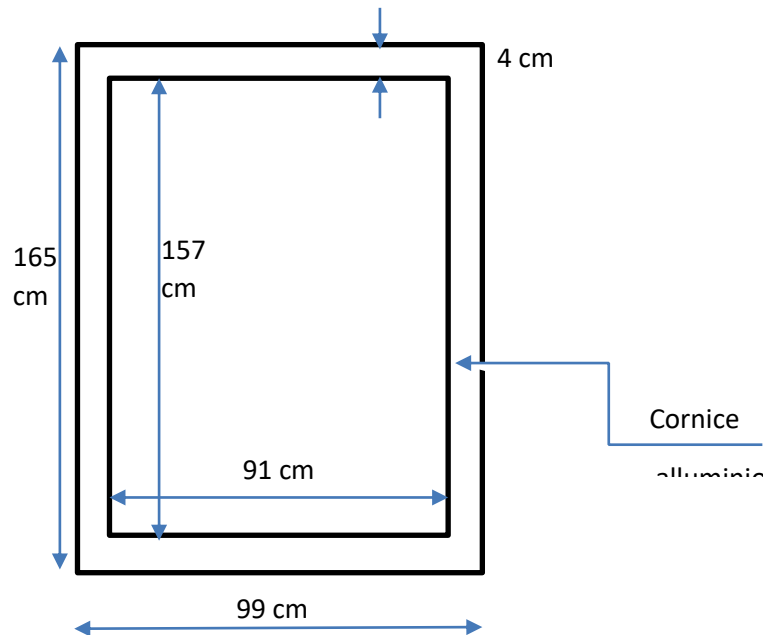


Figura 4–Schema in pianta del pannello fotovoltaico utilizzato come test per le prove di riciclo

Viene rimossa meccanicamente la junction box e i circuiti collegati al pannello.

Si eliminano le tracce del sigillante al silicone ancora adese al backsheet e si incide il silicone che tiene unito il pannello alla cornice di alluminio lungo i due lati lunghi del pannello. Si procede quindi con la rimozione delle componenti della cornice sui due lati lunghi del pannello. A questo punto si libera manualmente e con l'ausilio di un riscaldatore locale, un lembo di backsheet per un'ampiezza di circa 10 cm da collegare ai morsetti per lo strappo.

3.2 Descrizione della prova di rimozione del backsheet e dello strato di EVA

Il pannello viene posizionato con il lato lungo parallelo al lato maggiore del telaio del prototipo, fronte operatore. La prima operazione alla quale viene sottoposto il pannello è la rimozione del backsheet.

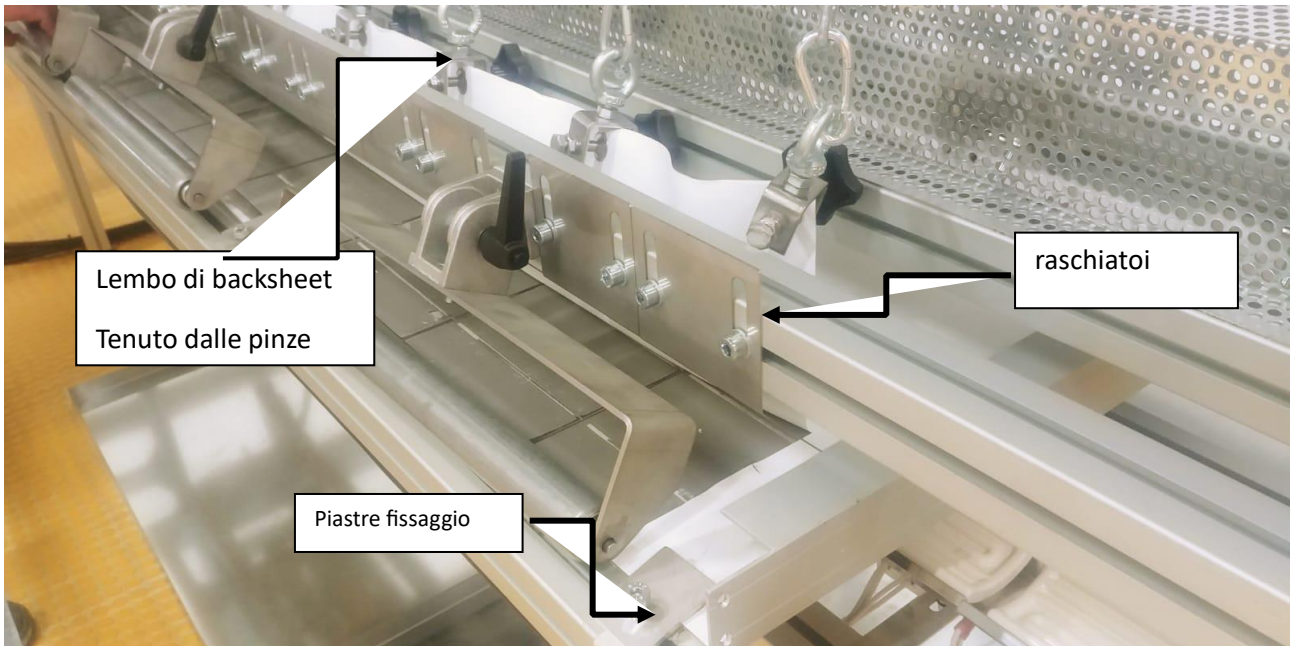


Figura 5– Fissaggio del pannello sul prototipo e assicurazione del lembo di backsheet tramite pinze di afferraggio

Prima di avviare la prova: 1) si agganciano i lembi del backsheet alle pinze di afferraggio, come mostrato in Figura 5; 2) si imposta il fine corsa; 3) si incide con il taglierino il backsheet intorno ai “fermi” metallici per favorirne il distacco; 4) si imposta la frequenza (Herz) della coppia del motore di trascinamento del lembo del backsheet 5) si accendono gli elementi riscaldanti agendo sul quadro elettrico; 6) si imposta la temperatura di riscaldamento; 5) si verifica la lettura della temperatura da parte della termocamera (Figura 6); 7) si imposta la prova in controllo “automatico”; 8) si copre l’area di lavoro del prototipo facendo ricadere il telo in PVC e si accende l’impianto di aspirazione delle emissioni diffuse

A questo punto l’operatore dà l’avvio alla prova.



Figura 6–Termocamera montata sul telaio del prototipo e diretta sulla superficie del backsheet

Le resistenze si riscaldano fino ad arrivare alla temperatura impostata sul pannello di controllo. Il tempo impiegato è dai 10 ai 15 minuti. Non appena la temperatura di setpoint viene superata, entra in azione il meccanismo automatico di strappo del telaio e il motore comincia ad avvolgere il tirante al quale è collegata la trave con le pinze di afferraggio del lembo. Lo strappo dura circa 10 secondi. Nel frattempo, la temperatura letta dalla termocamera si abbassa perché viene interessata un nuovo segmento del backsheet dal riscaldamento. Si attende il nuovo ciclo di riscaldamento e il successivo ingresso dell'azione del motore con il distacco di ulteriori centimetri del backsheet.

Il telaio prosegue con questa sequenza marcia e arresto fino al completo distacco del backsheet.

Nella fase successiva, si passa al raschiamento dell'EVA dal piano in vetro, inserendo i raschiatoi sul telaio e ripetendo le stesse operazioni precedentemente descritte per la rimozione del backsheet; i trucioli vengono raccolti nelle vasche sottostanti.

4 Conclusioni

In questo deliverable viene descritto il prototipo per il trattamento dei pannelli a fine vita in silicio cristallino finalizzato al recupero dei materiali contenuti. Tale prototipo è stato realizzato su specifiche tecniche ENEA e realizzato da ditta esterna individuata tramite procedura negoziata, composta da avviso di interesse e successiva gara. Il processo descritto si basa su un brevetto italiano di proprietà ENEA e Beta-Tech S.r.l. al 50 %. I parametri di processo individuati in questa fase, ovvero frequenza IR, tempi di esposizione, e la distanza tra la fonte IR e la superficie del pannello, andranno studiati nella successiva fase di sperimentazione. Scopo

della sperimentazione futura sarà quindi di ottenere informazioni esaustive sul ruolo rivestito dai suddetti parametri al fine della loro ottimizzazione sotto il profilo tecnologico, economico ed ambientale.

5 Riferimenti bibliografici

I riferimenti bibliografici devono essere richiamati nel testo con numeri progressivi tra parentesi quadre e riportati a fine testo con il seguente formato:

1. Gestione delle Anagrafiche Uniche Degli Impianti di produzione (GAUDÌ) - portale a livello nazionale che identifica in modo univoco gli impianti di produzione di energia elettrica (istituito dall'ARERA con delibera ARG/elt 124/10) sviluppato e gestito da Terna - <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/gaudi>
 2. Brevetto EP-893250 -Method for separating the components of a laminated glazing, Wambach Karsten, Stoetzel Eberhard
 3. Brevetto US6063995-Recycling silicon photovoltaic modules, Bohland John Raphael, Anisimov Igor Ivanovich
 4. Brevetto US6129779-Reclaiming metallic material from an article comprising a non-metallic friable substrate, Bohland John Raphael, Anisimov Igor Ivanovich, Dapkus Todd James, Sasala Richard Anthony, Smigielski Ken Alan, Kamm Kristin Danielle.
 5. Brevetto WO2014141311-Thermo-mechanical controlled cryogenic delamination process for the full recovery of rigid mono, polycrystalline or amorphous materials coated with plastic materials, Dassisti Michele),
 6. Brevetto CN105312303-No-damage recycling method for photovoltaic module, JiZhichao
 7. Brevetto italiano 102017000033488, concesso il 10-07-2019 dal titolo "Metodo a basso consumo energetico e a basso impatto ambientale per il recupero dei componenti principali dei pannelli fotovoltaici in silicio cristallino a fine vita ". ENEA e Beta-Tech S.r.l.
 8. Wei LiHong LiHong LiYong-Ming Zhang, "Preparation and investigation of PVDF/PMMA/TiO 2 composite film" Journal of Materials Science 44(2009):2977-2984
 9. Radek Polansky Martina Pinkerová Monika Bartůňková Pavel Prosr, "Mechanical Behavior and Thermal Stability of EVA Encapsulant Material Used in Photovoltaic Modules", Journal of Electrical Engineering 64(2013)
- Workshop: "IEMAP: la piattaforma italiana per la progettazione accelerata dei materiali per l'energia" ENEA Frascati, Aula Brunelli, 22/11/2022. <https://mission->

innovation.it/2022/11/17/workshop-iemap-la-piattaforma-italiana-per-la-progettazione-accelerata-dei-materiali-per-lenergia/

- Innovation Village 2023 “Tecnologie innovative per il riciclo di materie prime critiche da prodotti complessi a fine vita” tenutasi a Napoli il 10 maggio 2023 e curata da ENEA, sono state brevemente illustrate le attività tecniche in corso relative alla LA. (<https://innovationvillage.it>)

6 Abbreviazioni ed acronimi

- PFV: pannello fotovoltaico
- FV: modulo fotovoltaico
- C-Si: silicio cristallino
- EVA: etilen vinil acetato
- PVF: polivinilfloruro
- PET: polietilentereftalato
- PVC: polivinilcloruro
- VOC: volatile organic compound
- RAEE: rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche