

**MISSION
INNOVATION**

accelerating the clean energy revolution

POA MATERIALI AVANZATI PER L'ENERGIA**PROGETTO IEMAP - Piattaforma Italiana Accelerata per i Materiali per
l'Energia**

D4.7 - DESCRIZIONE DEL METODO A BASSO IMPATTO AMBIENTALE PER IL TRATTAMENTO IN CONTINUO DEI PANNELLI FOTOVOLTAICI FINALIZZATO AL RECUPERO DI MATERIALI ED ADATTO AD UN'IMPLEMENTAZIONE INDUSTRIALE AD ELEVATA AUTOMAZIONE

L. M. Cafiero, V. Piergrossi, M. Tammaro, L. Tuccinardi, R. Tuffi
ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

D4.7 - DESCRIZIONE DEL METODO A BASSO IMPATTO AMBIENTALE PER IL TRATTAMENTO IN CONTINUO DEI PANNELLI FOTOVOLTAICI FINALIZZATO AL RECUPERO DI MATERIALI ED ADATTO AD UN'IMPLEMENTAZIONE INDUSTRIALE AD ELEVATA AUTOMAZIONE

L. M. Cafiero, V. Piergrossi, M. Tammaro, L. Tuccinardi, R. Tuffi
(ENEA)

Dicembre 2024

Report MISSION INNOVATION

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA
Mission Innovation 2021-2024 - III annualità

Progetto: Piattaforma accelerata per i Materiali per l'Energia

Work package: Materiali per fotovoltaico

Linea di attività 4.6: LA4.6, Riciclo materiali dai pannelli a fine vita. Sperimentazione su pannelli ed implementazione di un metodo sostenibile finalizzato al recupero dei materiali dai pannelli in silicio cristallino

Responsabile del Progetto: Massimo Celino (ENEA)

Responsabile della LA: Marco Tammaro (ENEA)

Indice

1	Risultati attesi.....	5
2	Risultati ottenuti.....	5
2.1	Avanzamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale con riferimento ai risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi.....	6
4	Prodotti ottenuti.....	6
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati	6
6	Sintesi delle attività svolte.....	6
7	Dettaglio delle attività svolte	7
7.1	Attività sperimentale	7
7.2	Attività di studio dell'upgrading a TRL7.....	8
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	8
9	Pubblicazioni scientifiche	9
10	Eventi di disseminazione	9
11	Descrizione dei risultati ottenuti	9
11.1	Risultati attività sperimentale	9
11.2	Risultati dello studio di upgrading a TRL7	11
12	Riferimenti.....	16

Indice delle figure

Figura 1 . – Pannello delaminato.....	11
---------------------------------------	----

Indice delle tabelle

Tabella 1. -Variazione della frequenza di assorbimento elettrico del motore in funzione dell'introduzione di masse a peso noto.....	10
Tabella 2 - Calcolo del tempo ciclo di trattamento del singolo modulo	14
Tabella 3. - Voci di costo considerate per il calcolo del costo industriale di trattamento	15

1 Risultati attesi

L'attività proposta ha come scopo la prosecuzione e conclusione delle attività iniziate nelle LA4.4 e LA 4.5, focalizzando in particolare l'attenzione sull'implementazione di un metodo per il trattamento sostenibile ed in continuo dei moduli in silicio cristallino a fine vita e finalizzato al recupero dei materiali contenuti.

In sintesi:

- Implementazione di un metodo per il trattamento dei pannelli in silicio cristallino finalizzato al recupero dei materiali e che tenga conto delle caratteristiche peculiari degli oggetti trattati.
- Definizione di un metodo sostenibile per la gestione del flusso di rifiuti dai pannelli fotovoltaici con recupero di preziose risorse.

2 Risultati ottenuti

Con la LA 4.6 è stato definito un metodo sostenibile per il trattamento dei moduli in silicio cristallino finalizzato al recupero dei materiali in esso contenuti e che tiene conto delle caratteristiche peculiari dei rifiuti trattati. Tali risultati sono stati perseguiti attraverso sia attività sperimentali che con uno studio specifico. Le attività sperimentali hanno riguardato test di delaminazione sul prototipo realizzato in LA4.4 ed ottimizzato nella LA 4.5. Lo studio effettuato illustra una proposta tecnico-economica di industrializzazione del processo di recupero di componenti di pregio da moduli fotovoltaici. Esso dimostra come il processo analizzato possa essere adatto ad un'implementazione di tipo industriale, anche in ragione della sua semplicità impiantistica e per il suo ridotto impatto ambientale in termini di contenute emissioni gassose e polverose. Questo, inoltre, si può poi tradurre in una facilitazione nell'eventuale iter autorizzativo di un impianto industriale basato su questo metodo.

La realizzazione di un processo di recupero di materie prime, critiche e non, oltre che rispondere ad un preciso input del Regolamento Europeo CRM ACT, ovvero che ogni Paese dell'EU provveda al proprio fabbisogno di CRM attraverso il riciclo per almeno il 25 %, rappresenterebbe una fonte di approvvigionamento importante per il sistema Paese in settori strategici quali energie rinnovabili, digitale, difesa, etc.

2.1 Avanzamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale con riferimento ai risultati ottenuti

I moduli fotovoltaici a fine vita sono rifiuti particolari essendo realizzati con un design vecchio anche di 20-25 anni e non pensato per il riciclo. Il metodo sviluppato non è di tipo distruttivo in quanto, in linea con un approccio prodotto centrico, punta a recuperare tutti i suoi componenti, inclusa la parte polimerica, che, ad esempio, nei processi termici viene distrutta. Inoltre, a differenza dei processi meccanici, che utilizzando ad esempio la triturazione, il processo studiato evita emissioni di polvere ed elevati consumi di energia e di materiali, non incorrendo in fenomeni di usura delle leghe di cui sono composti martelli/coltelli trituratorie. Infatti il metodo innovativo qui presentato punta a far intervenire, previo un contenuto riscaldamento a temperature $<150^{\circ}\text{C}$, un processo di delaminazione degli strati polimerici per via meccanica in modo da

“liberare” le restanti componenti metalliche di maggiore pregio, garantendo bassi impatti ambientali (in termini di emissioni gassose e polverose) e fabbisogni di energia contenuti.

Diversamente, la tecnologia tradizionale, al fine di raggiungere lo stesso scopo, prevede 1) o un trattamento meccanico di frantumazione accompagnato da ingenti consumi energetici e di materiali 2) o un trattamento termico di degradazione dell'EVA accompagnato anch'esso da dispendio di energia, a cui si aggiungono emissioni gassose pericolose da gestire mediante un apparato impiantistico non trascurabile.

3 Prodotti attesi

Per questa LA non è stata prevista la realizzazione di prodotti hardware/software. Il prodotto atteso è rappresentato dal presente Rapporto Tecnico.

4 Prodotti ottenuti

Per questa LA non è stata prevista la realizzazione di prodotti hardware/software. Il prodotto ottenuto è rappresentato dal presente Rapporto Tecnico.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non ci sono stati scostamenti significativi su attività e risultati se non nella data di fine attività, che è stata spostata da M36 a M42. Questo scostamento è stato consequenziale agli scostamenti delle LA 4.4 e LA 4.5 ad essa collegate.

6 Sintesi delle attività svolte

Le attività svolte in ambito LA 4.6 hanno riguardato una prima parte sperimentale alla quale è seguita una di studio di un'ipotesi di upgrading a TRL7.

La parte sperimentale ha integrato e completato quanto svolto in LA 4.4 e LA 4.5, con l'esecuzione di test finalizzati all'ottimizzazione dei parametri di processo dell'apparecchiatura prototipale TRL5 denominata PROTEO, il cui funzionamento è basato sul brevetto ENEA-BetaTech n. IT102017000033488.

In particolare, l'attività sperimentale è consistita in prove di delaminazione dello strato di backsheet a diverse temperature in un intervallo compreso tra 50°C e 150°C ed a diverse tensioni di strappo. Questi test hanno avuto lo scopo di ricavare i valori ottimali in termini di risultato e tempi di esecuzione.

La parte di studio ha riguardato la stesura delle specifiche per l'implementazione industriale del processo studiato. Le presenti indicazioni hanno tenuto conto dei risultati della campagna di test di delaminazione condotta con il prototipo TRL5 PROTEO.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Attività sperimentale

Nell'attività sperimentale, a completamento delle attività già svolte, si sono affrontati i seguenti aspetti:

Fase di inizializzazione del backsheet propedeutica all'afferraggio

- Identificazione delle dimensioni minime del lembo di backsheet inizializzato
Le dimensioni minime del lembo di backsheet che il sistema di afferraggio aggancia ai fini dello strappo sono state definite in base agli esiti delle operazioni di ottimizzazione della distanza tra lampade IR e il backsheet, posizionato in modo da evitarne il contatto con le lampade.
- Identificazione dell'approccio termico/meccanico di inizializzazione
L'inizializzazione manuale del backsheet è stata svolta modificando gradualmente la distanza della fonte di riscaldamento dalla superficie del backsheet e la posizione relativa dell'elemento impiegato per l'operazione di incisione del backsheet.
- Identificazione dell'inizio del rammollimento degli strati polimerici e quindi del distacco
Il monitoraggio della temperatura sulla superficie del backsheet è stato eseguito utilizzando una termocoppia da contatto durante le procedure di tear-off manuale del lembo di backsheet. Affinché si generi il distacco è necessario che si arrivi al rammollimento degli strati polimerici. La temperatura di rammollimento è funzione di diversi parametri (composizione degli strati polimerici, velocità di riscaldamento, geometria del modulo) e quindi varia da pannello a pannello. Per cui l'attività sperimentale ha potuto solo individuare le condizioni di inizio rammollimento per la tipologia di modulo usato ed identificarne il range massimo di temperatura di degradazione dello strato polimerico (backsheet)
Il backsheet può essere costituito da diversi materiali, variabili da modulo a modulo (es. PET, PVF), ma le cui proprietà sono note. Spesso il BS è costituito da strati di materiali diversi. Per ognuno di esso esiste un range di temperature oltre il quale si osserva l'insorgere di fenomeni di degradazione. Per cui l'attività sperimentale ha potuto solo individuare le condizioni per la tipologia di modulo usato. Il monitoraggio della temperatura sulla superficie del backsheet è stato eseguito utilizzando una termocoppia da contatto durante le procedure di tear-off manuale del backsheet.

Processo di riscaldamento del pannello tramite lampade IR

- Temperatura e frequenza IR delle lampade
Nell'ipotesi di industrializzazione, è stato scelto di approfondire le conoscenze della temperatura dei corpi emittenti delle lampade IR e dei range spettrali responsabili del rammollimento degli strati polimerici e del livello di degradazione del backsheet, attraverso l'installazione di lampade IR dotate di termocoppia integrata per il controllo della temperatura del corpo emittente
- Tempi di esposizione
La durata della fase di riscaldamento è stata studiata attraverso una procedura di tear-off check applicando tentativi programmati di attivazione della tensione di strappo durante il riscaldamento progressivo della superficie superiore e inferiore del pannello
- Distanza tra la fonte termica della lampada IR e la superficie superiore e inferiore del pannello
Sono stati variati 1) l'orientamento delle lampade agendo sull'inclinazione dell'angolo di illuminazione e 2) la distanza dalla superficie del modulo.

- Identificazione del valore minimo di temperatura di distacco
Il monitoraggio della temperatura sulla superficie del backsheet è stato eseguito utilizzando alternativamente: termocamera e termocoppia durante le procedure di tear-off check;
- Identificazione del valore massimo di temperatura di degradazione dello strato polimerico
Nel corso del monitoraggio della temperatura sulla superficie del backsheet è stato accertato il raggiungimento del range di temperature di degradazione sulla superficie del backsheet tramite indagine visiva;

Processo di strappo del backsheet

- Le misure della tensione di strappo sono state effettuate attraverso prove di equilibrio di carico, con utilizzo di dinamometro e agganciando masse di peso note al sistema di trazione.

7.2 Attività di studio dell'upgrading a TRL7

I risultati delle attività sperimentali sono stati utilizzati per l'elaborazione di una proposta tecnico-economica per l'upgrading del processo di delaminazione al TRL7.

In particolare, sono stati ricavati dati utili per stabilire:

- 1) l'efficacia del riscaldamento promosso dalle lampade (numero, posizione, area di lavoro);
- 2) la forza necessaria per l'azione di strappo del backsheet;
- 3) l'efficacia dell'azione a contrasto della deformazione della lamina di vetro;
- 4) l'efficacia dei raschiatoi come soluzione per la rimozione dell'EVA;
- 5) la fattibilità di un sistema automatico di rimozione del bordo iniziale del backsheet.

Sulla base dei sopra-elencati punti è stata quindi ipotizzata la realizzazione di un'apparecchiatura da realizzarsi su scala industriale in grado di:

- trattare 25 pannelli fotovoltaici su un turno di lavoro di 8 ore;
- impiegare un tempo macchina per la rimozione degli strati di backsheet ed incapsulante inferiore a 20 minuti.

Tale studio è stato corredato da un'analisi economica dei costi di gestione e di investimento dell'apparecchiatura.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nell'ambito della LA4.5, iniziata precedentemente alla LA4.6 ma che poi si è sovrapposta ad essa ed è terminata contemporaneamente per effetto degli scostamenti temporali, ci si è avvalsi di una consulenza per l'elaborazione di una proposta tecnico economica riguardante l'implementazione industriale del metodo studiato.

Tenendo quindi conto degli scostamenti temporali che hanno determinato una sovrapposizione parziale tra la LA4.5 e LA4.6, in un'ottica di ottimizzazione delle risorse e del tempo disponibile, i risultati di tale consulenza sono stati utilizzati sia all'interno della LA4.5 che della LA4.6.

Per la LA4.6 i risultati sono stati utilizzati per la definizione dell'implementazione industriale del processo di separazione dei componenti principali del modulo e la relativa redazione di specifiche tecniche per l'upgrading impiantistico.

In particolare, lo studio prodotto ha basato il proprio lavoro su test di delaminazione dello strato protettivo in PET e dello strato di incapsulante svolti da ENEA. Detto studio indica le soluzioni e le specifiche tecniche ad esse correlate per le operazioni iniziali di distacco del backsheet, introducendo elementi di automazione e un sistema di riscaldamento uniforme di tutta la superficie utile di lavoro.

9 Pubblicazioni scientifiche

Protopapa M. L., Ansanelli G., Pietrantonio, M. Tammaro M., 2024 "Research activity on pv waste recycling in ENEA" *Detritus* **28**, 121-128, DOI 10.31025/2611-4135/2024.19409

10 Eventi di disseminazione

- Oral Re-think Circular Economy Forum, Taranto 2024
- IEMAP Training Course, Ottobre 2024
- Oral Venice Symposium 2024

11 Descrizione dei risultati ottenuti

11.1 Risultati attività sperimentale

Fase di inizializzazione del backsheet propedeutica all'afferraggio

- Identificazione della minima estensione del lembo di backsheet inizializzato
L'attività di ottimizzazione dell'inizializzazione manuale ha restituito la necessità di ottenere un'estensione di 100 - 150 mm riferita al lembo di backsheet sollevato;
- Identificazione del valore minimo di temperatura di distacco
L'utilizzo di una termocoppia da contatto durante le procedure di tear-off manuale di backsheet ha permesso di ricavare un valore minimo per garantire le condizioni di distacco nel range: $70 \div 100$ °C, in linea con la letteratura di settore;
- Identificazione del range massimo di temperature di degradazione dello strato polimerico
L'utilizzo di una termocoppia da contatto durante le procedure di tear-off manuale del lembo di backsheet ha permesso di ricavare un range di temperature massime raggiungibili prima che insorgano fenomeni degradativi del polimero; tale campo coincide con l'intervallo: $150 \div 180$ °C, in linea con la letteratura di settore;

Azione di riscaldamento del pannello tramite lampade IR

- Temperatura e frequenza IR delle lampade
Nello studio è stata indicata la proposta di soluzione di installazione di lampade IR. Inoltre risulta necessario monitorare e controllare la temperatura raggiunta dal corpo emittente;
- Tempi di esposizione
Il tempo di esposizione massimo del backsheet all'azione di irraggiamento e di tear-off meccanico, prima dell'insorgenza di fenomeni degradativi, nelle condizioni sperimentali, è stato individuato in circa 300 secondi;
- Distanza tra la fonte termica della lampada IR e la superficie superiore e inferiore del pannello
L'orientamento del corpo riscaldante rispetto al piano del pannello è risultato essere per una inclinazione di 30-45 gradi; la distanza invece è funzione della potenza della lampada usata.
- Identificazione dello strumento di misura della temperatura
La termocamera è uno strumento efficace nei tempi di risposta (ordine di secondi), mentre la termocoppia (di tipo T riferita allo specifico intervallo di temperatura) è più efficace per accuratezza e scostamento dal dato reale.
- Identificazione del range massimo di temperatura di degradazione dello strato polimerico
Le prove effettuate hanno permesso di accertare, all'insorgere di fenomeni di alterazione dello strato polimerico, il superamento della temperatura richiesta per le operazioni di delaminazione strettamente legate alla tipologia di modulo utilizzato;

Azioni di strappo del backsheet

I risultati delle prove di equilibrio di carico effettuate con carichi noti sono riportate nella Tabella 1.

Tabella 1. -Variazione della frequenza di assorbimento elettrico del motore in funzione dell'introduzione di masse a peso noto

Massa a peso noto (kg)	Forza di trazione (Newton)	Frequenza di assorbimento elettrico del motore (Hz)
21	210	5
60	600	10
70	700	12
80	800	15
125	1250	20

Il motore che aziona il meccanismo del telaio per le operazioni di delaminazione è controllato da un inverter secondo una legge standard $V/f=\text{costante}$, dove V è la tensione di alimentazione del motore ed f è la frequenza. Per frequenze inferiori a 50 Hz, l'inverter mantiene il flusso magnetico costante. Teoricamente la

potenza erogata è crescente linearmente con V/f e la coppia motrice è costante. Anche la corrente assorbita è quasi costante. Quando tuttavia, viene introdotto un (nuovo) carico costante, come è il caso di questa prova, avviene uno scorrimento nel motore elettrico, ovvero una variazione della coppia motrice che assumerà un nuovo valore, costante, in corrispondenza di un (nuovo) stato di equilibrio.

Prove di delaminazione

Si descrive qui di seguito i risultati della prova di delaminazione (Figura 1).

Una volta posizionato il pannello sul piano, si è proceduto all'accensione delle lampade.

Le lampade sono state orientate con un'inclinazione di 30-45° in modo da irraggiare il backsheet lungo la linea di adesione. In pochi minuti la temperatura del backsheet ha raggiunto il valore prefissato di temperatura, e si è ottenuto un primo avanzamento dello strappo del backsheet.

Nel corso delle prove si è osservato che, a causa della configurazione del telaio e della struttura di supporto delle lampade, alcune zone del backsheet rimangono fuori dalla portata di irraggiamento delle lampade.



Figura 1 . – Pannello delaminato.

11.2 Risultati dello studio di upgrading a TRL7

Osservazioni sperimentali alla base dell'ipotesi di upgrading a TRL7

Dagli esiti delle attività sperimentali descritte nel paragrafo precedente, sono state formulate le seguenti osservazioni tecniche di partenza per l'ipotesi di upgrading a TRL7. Si precisa che le condizioni fornite sono strettamente legate alla tipologia di modulo fotovoltaico trattato. Le caratteristiche chimico-fisiche dei materiali, di cui sono costituiti i moduli, sono note e presenti nella letteratura scientifica.

1) Sistema di riscaldamento

- a. L'inclinazione delle lampade poste sul piano superiore (fronte BS) può essere ottimizzata per riscaldare in modo soddisfacente lo strato di BS interessato.
- b. Le lampade possono trovarsi ad una distanza non adeguata a riscaldare il BS alla temperatura ottimale per la sua rimozione.
- c. Il riscaldamento localizzato su una porzione limitata del BS genera discontinuità nel processo.
- d. La misura della temperatura con la Termocamera IR è risultata essere influenzata da interferenze del campo ottico del sensore con la radiazione delle lampade IR;

2) Sistema di aggancio del BS

- a. Il sistema utilizzato risulta essere non agevole per l'operatore a causa del suo ingombro;
 - b. Il sistema di strappo è efficace a condizione che la porzione di BS sia interessata dal raggiungimento uniforme della temperatura dell'area interessata;
- 3) Telaio
- a. Il telaio deve essere opportunamente dimensionato in termini di spessori e materiali in modo da apporre la resistenza giusta all'azione di strappo.
- 4) Raschiamento dello strato di incapsulante in EVA
- a. l'ipotesi di una rimozione dell'EVA per mezzo di un approccio termo-meccanico basato su un'azione di riscaldamento e raschiamento, si è dimostrato non abbastanza efficace in quanto i raschiatoi hanno subito una deformazione senza riuscire ad asportare efficacemente lo strato di incapsulante;

Conclusioni per progettare Interventi di miglioramento

- a. Necessità di aumentare la velocità di strappo del BS ponendo quale obiettivo finale una velocità di delaminazione in grado di permettere il trattamento di 25 pannelli fotovoltaici su un turno di lavoro di 8 ore ed impiegare un tempo macchina per la rimozione degli strati polimerici inferiore ai 20 minuti.
- b. Intervallo di temperatura necessari ad ottenere la condizione di rammollimento degli strati polimerici sono fortemente dipendenti dal tipo di materiale di cui sono costituiti i moduli e comunque non appaiono elevati (<150 °C) °C
- c. Risulta importante avere un controllo continuo e puntuale sulla forza di strappo e quindi sulla velocità di delaminazione;
- d. Aumentare il livello di automazione della fase di distacco iniziale del BS

Studio di upgrading a TRL7 del sistema

Al fine di aumentare il livello di automazione ed affidabilità del processo di delaminazione, lo studio di upgrading a TRL7 è stato eseguito conservando il layout generale ed i cinatismi che hanno caratterizzato il precedente prototipo TRL5.

Fasi preparatorie del pannello:

Le fasi preparatorie, in particolare quelle relative al distacco della cornice di alluminio e della scatola di giunzione, possono prevedere l'utilizzo di tecnologie collaudate ed esistenti sul mercato, come riportato nel seguente elenco:

1. Henan Recycle Env Protection Equipment Co., Ltd China, <https://www.henanrecycle.com/ABOUT-US/>
2. Suny Group Zhengzhou Henan China, <https://www.sunygroup.cn/>
3. Mana Ito Environmental Products Sales Dept., NPC Incorporated Matsuyama Factory 2889 Nishihabumachi, Matsuyama-shi, 791-8044 Japan, <https://www.npcgroup.net/eng/company/company-profile>
4. Veolia, 36-38 Avenue Kleber Paris, 75116 France - <https://www.veolia.com/>

Ad esempio, quella prodotta dalla cinese NPC incorporated, il cui funzionamento è mostrato in un video illustrativo disponibile al seguente collegamento ipertestuale: <https://youtu.be/6rxoBdVkiXs>; il dispositivo è

offerto ad un importo di circa € 10.000, costi di trasporto inclusi. Questa tecnologia si articola nelle fasi seguenti:

- posizionamento manuale del pannello sul ripieno del disassemblatore automatico;
- distacco della scatola di giunzione mediante lama calda azionata idraulicamente;
- smantellamento della cornice mediante dispositivo ad azione idraulica, posizionato al centro del pannello, lato BS, che dirige la spinta di bracci di acciaio a pistone in tutte le direzioni premendo contro le sue pareti interne;

Inizializzazione del Backsheet:

Per la fase di distacco iniziale del BS è stata ideata una soluzione basata sulla realizzazione di un portale ausiliario antistante alle lampade equipaggiato per il riscaldamento localizzato che consente il distacco del BS.

Azione di riscaldamento

Nell'implementazione industriale la fase di riscaldamento sarà ottimizzata per limitare le discontinuità di processo, dovute a disallineamenti tra le posizioni delle lampade e l'area del backsheet da sottoporre a riscaldamento.

La soluzione proposta consiste nell'assicurare un riscaldamento omogeneo su tutta la superficie del pannello, fino al raggiungimento della temperatura di rammollimento degli strati polimerici e quindi di sollevamento/distacco. In questo modo, il sistema di tiraggio/strappo sarà agevolato nella sua azione.

Un riscaldamento distribuito su tutta la superficie del pannello fronte BS, con l'utilizzo di lampade IR consentirà la richiesta omogeneità nel raggiungimento della temperatura desiderata eliminando il problema della discontinuità.

Lo studio di upgrading a TRL7 include dunque le seguenti modifiche al sistema di riscaldamento:

- utilizzo di un numero di lampade adatto a riscaldare l'intera superficie;
- utilizzo di riflettori a servizio di una intera fila di lampade, per ridurre le dispersioni termiche delle lampade stesse.
- attuazione di un controllo della potenza delle lampade**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.****Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**.. Questo assetto permette risparmi di consumo energetico.
- inserimento di lampade con termocoppia incorporata.

Sistema di afferraggio del Backsheet

Si ipotizza un sistema semiautomatico di afferraggio che sfrutti un sistema pneumatico.

A titolo di esempio si riportano i riferimenti di alcuni modelli di piastre a ventosa disponibili sul mercato:

- 1) <https://www.schmalz.com/en/vacuum-technology-for-automation/vacuum-components/vacuum-suction-cups/suction-cups-for-high-temperature-applications/suction-plates-for-high-temperature-spl-ht-305821/>
- 2) <https://www.schmalz.com/en/vacuum-technology-for-automation/vacuum-components/vacuum-suction-cups/suction-cups-for-high-temperature-applications/suction-plates-for-high-temperature-spl-ht-fpm-f-305813/>

Ottimizzazione del telaio

Dai test descritti nel paragrafo 1.3 sono emerse criticità del telaio che possono essere superate prevedendo interventi migliorativi come descritti in questo paragrafo.

La progettazione deve prevedere:

- Il prolungamento del telaio, atto ad ospitare la matrice di lampade, e supporto della matrice di lampade con ruote/rulli folli;
- Aumentare la coppia meccanica utile all'azione di strappo;

Gli ingombri previsti dal telaio con questa configurazione sono stimati in 3x3,5 metri in pianta, per un'altezza di 2,7metri.

Gli ingombri indicati sono al netto di eventuali box di contenimento della struttura e di spazi di manovra necessari per le operazioni

Valutazione dei costi di investimento e operativi di processo

Stima dei tempi di trattamento

A valle degli interventi migliorativi proposti nei paragrafi precedenti, è stata effettuata una stima del tempo necessario per le operazioni di rimozione dello strato protettivo (BS) e dell'incapsulante (in EVA) suddividendolo come riportato in Tabella 2 in sub-fasi.

Tabella 2 - Calcolo del tempo ciclo di trattamento del singolo modulo

Numero fase	Descrizione fase	Durata (minuti)
1	Rimozione della cornice e della scatola di giunzione	5
2	Posizionamento del modulo sul telaio	1
3	Sollevamento del lembo di BS	5
4	Preriscaldamento lampade fino a T di distacco (60-90°C) – avviene simultaneamente alle fasi 1-3	10-15
5	Separazione del back sheet	1
6	Rimozione dell'EVA per raschiamento	1
7	Recupero dell'EVA mediante sistema di aspirazione	5
8	Rimozione del modulo dal telaio	1
Durata temporale complessiva per le operazioni di rimozione meccanica per un singolo pannello		19-25

Da quanto riportato in Tabella 2, con un turno di lavoro di 8 ore una macchina industriale riuscirebbe a trattare 25 pannelli.

Valutazione dei costi di trattamento su scala industriale

La stima del costo di trattamento su scala industriale è stato suddiviso tra costi di investimento e costi operativi. Il dettaglio delle diverse voci è riportato in Tabella 3

Tabella 3. - Voci di costo considerate per il calcolo del costo industriale di trattamento

Costi di investimento	
Apparecchiatura per la separazione degli strati di BS e di incapsulante (in EVA0) con capacità di 1 uno strato di BS al minuto [€]	150.000
Sistema automatico di rimozione della cornice e della scatola di giunzione [€]	10.000
Ammortamento [anni]	5
Produzione (n° pannelli trattati in 330 giorni)	24.750
Costi del personale	
n. 3 turni di lavoro 10 persone per 30.000€/anno	300.000
Incidenza [€/pannello]	12,12
Costi operativi per il trattamento di 1 pannello	
Consumi elettrici lampade ¹ (5,25 kWh*0.25€/kWh) [€]	1,31
Consumi motore elettrico (0.008kWh*0.25€/kWh) [€]	0,002083
Consumi elettrici fase sollevamento BS (0.015kWh*0.25€/kWh)[€]	0,003742
Manutenzione	
Valore stimato 3% dell'investimento	4.800
Incidenza [€/pannello]	0,19
Spese generali	
Valore stimato 15% del costo del personale	45.000
Incidenza [€/pannello]	1,82
Totale [€/pannello]	15,49

Come da riquadro riassuntivo, il costo di investimento è stimato per un importo di € 150.000, mentre quello di trattamento per un singolo pannello, per un importo di € 15.

L'apparecchiatura di taglia industriale introduce uno stadio di automazione per il sollevamento del bordo dello strato protettivo e nella estrazione dell'incapsulante, con il vantaggio di consentire il successivo recupero delle componenti di maggiore pregio delle celle, dei metalli e del vetro

¹ Corrisponde all'assorbimento di 60 lampade che operano per 15 minuti per singolo pannello, alla potenza del 70% della potenza nominale delle lampade

12 Riferimenti

- “New era in backsheets materials?”, Jorma Peltola Technical Director, Americas & EU, Cybrid Technologies Inc., <https://it.scribd.com/document/598893820/PV-New-Era-in-Backsheet-Materials>
- Allen Norman S., Edge Michele, Rodriguez Miguel, Liauw Cristopher M., Fontan Eusebio, Aspects of the thermal oxidation of ethylene vinyl acetate copolymer, *Polymer Degradation and Stability* 68 (2000) 363±371
- Badiie A., Ashcroft I.A., Wildman R.D. The thermo-mechanical degradation of ethylene vinyl acetate used as a solar panel adhesive and encapsulant. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 68, 2016, Pages 212-218.
- Buerhop-Lutz, C. et al. PV modules and their backsheets - A case study of a Multi-MW PV power station. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 231, 111295 (2021).
- Cali, M., Hajji, B., Nitto, G., & Acri, A. (2022). The Design Value for Recycling End-of-Life Photovoltaic Panels. *Applied Sciences*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/app12189092>
- Chowdhury, M. S., Rahman, K. S., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., Akhtaruzzaman, M., Tiong, S. K., Sopian, K., & Amin, N. (2020). An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. In *Energy Strategy Reviews* (Vol. 27). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>
- Divya, A., Adish, T., Kaustubh, P., & Zade, P. S. (2023). Review on recycling of solar modules/panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 253, 112151. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112151>
- Farrell, C., Osman, A.I., Zhang, X. et al. Assessment of the energy recovery potential of waste Photovoltaic (PV) modules. *Sci Rep* 9, 5267 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41762-5>
- Gagliardi M., Lenarda P., Paggi M., A reaction-diffusion formulation to simulate EVA polymer degradation in environmental and accelerated ageing conditions, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 164 (2017) 93-106
- Ghahremani, A., Adams, S. D., Norton, M., Khoo, S. Y., & Kouzani, A. Z. (2024). Delamination Techniques of Waste Solar Panels: A Review. In *Clean Technologies* (Vol. 6, Issue 1, pp. 280–298). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6010014>
- Hirschl Ch., Biebl–Rydlo M., DeBiasio M., Mühleisen W., Neumaier L., Scherf W., Oreski G., Eder G., Chernev B., Schwab W., Kraft M., 2013 “Determining the degree of crosslinking of ethylene vinyl acetate photovoltaic module encapsulants—A comparative study”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 116, 2013, Pages 203-218, ISSN 0927-0248, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.04.022>.
- Kempe M. D. and Wohlgemuth J. H., "Evaluation of temperature and humidity on PV module component degradation," 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Tampa, FL, USA, 2013, pp. 0120-0125, doi: 10.1109/PVSC.2013.6744112.
- Nyambo Calistor, Wilkie Charles A., Layered double hydroxides intercalated with borate anions: Fire and thermal properties in ethylene vinyl acetate copolymer, *Polymer Degradation and Stability* 94 (2009) 506–512, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.02.001>
- Scott E. Julien, Michael D. Kempe, Joshua J. Eafanti, Joshua Morse, Yu Wang, Andrew Fairbrother, Sophie Napoli, Adam W. Hauser, Liang Ji, Gregory S. O'Brien, Xiaohong Gu, Roger H. French, Laura S. Bruckman, Kai-tak Wana, Kenneth P. Boyce, Characterizing photovoltaic backsheets adhesion degradation using the wedge and single cantilever beam tests, Part I: Field Modules, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 215 (2020) 110669
- Scott E. Julien, Michael D. Kempe, Joshua J. Eafanti, Joshua Morse, Yu Wang, Andrew Fairbrother, Sophie Napoli, Adam W. Hauser, Liang Ji, Gregory S. O'Brien, Xiaohong Gu, Roger H. French, Laura S. Bruckman, Kai-tak Wana, Kenneth P. Boyce, Characterizing photovoltaic backsheets adhesion degradation using the wedge and single cantilever beam tests, Part I: Field Modules, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 211 (2020) 110524
- Trivedi, H., Meshram, A., & Gupta, R. (2023). Recycling of photovoltaic modules for recovery and repurposing of materials. In *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 11, Issue 2). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109501>