

*Corso di Laurea Triennale in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio
Università degli studi di Padova*

ANALISI DELLA CONVENIENZA AMBIENTALE DELLE TECNOLOGIE PER IL RICICLO DEI PANNELLI FOTOVOLTAICI C-SI

Anno Accademico 2021/2022

**Candidata: Carlesso Lisa
n. Matricola: 1193291**

Relatrice: Docente Mazzi Anna

Indice

INTRODUZIONE

Capitolo 1 – Le caratteristiche dei pannelli fotovoltaici

- 1.1 I PANNELLI FOTOVOLTAICI
- 1.2 LA STRUTTURA DEL PANNELLO FOTOVOLTAICO
 - 1.2.1 L' impianto fotovoltaico
 - 1.2.2 Tipologie di pannelli fotovoltaici
- 1.3 IL PROBLEMA DEL FINE VITA
- 1.4 OBIETTIVI

Capitolo 2 – Materiali e Metodi

- 2.1 ANALISI DEI REQUISITI LEGISLATIVI E TECNICI
- 2.2 ANALISI DELLE TECNOLOGIE
- 2.3 ANALISI DELLA LETTERATURA SCIENTIFICA
- 2.4 ANALISI DEI BREVETTI
- 2.5 DEFINIZIONE E SCOPO DELLA LIFE CYCLE ASSESSMENT

Capitolo 3 – Risultati analisi della legislazione e della normativa

Il quadro legale / regolamentare del recupero e riciclo dei moduli a fine vita

- 3.1 DEFINIZIONI E DECRETI
 - 3.1.1 Definizioni
 - 3.1.2 Decreti
- 3.2 LE RESPONSABILITÀ

Capitolo 4 – Risultati Analisi delle Tecnologie

Il riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita

- 4.1 I PROCESSI DI RICICLO
 - 4.1.1 Fasi di riciclo
 - 4.1.2 Tipologie di trattamento
 - 4.1.3 Sistemi per il riciclo
- 4.2 I VANTAGGI ECONOMICI ED AMBIENTALI LEGATI AL RICICLO
- 4.3 IL POTENZIALE DANNO ECOLOGICO DEL MANCATO RICICLO DEI PANNELLI FOTOVOLTAICI - Lo studio di IRENA

Capitolo 5 – Risultati Analisi di Letteratura

Gli impatti ambientali del riciclo dei pannelli solari in silicio cristallino (c-Si)

- 5.2 UNA VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA DEI PANNELLI SOLARI IN SILICIO CRISTALLINO (C-SI)
 - 5.2.1 Valutazione delle emissioni di GHG ('Greenhouse gas') degli impianti fotovoltaici e conseguente riscaldamento globale
 - 5.2.2 Progetti Europei e confronto delle Tecnologie di riciclaggio dei pannelli fotovoltaici

Capitolo 6 – Risultati Analisi dei Brevetti

6.1 Metalli pesanti inquinanti e metalli preziosi

6.1.1 PIOMBO

6.1.2 ARGENTO

CONCLUSIONI

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI

INTRODUZIONE

A causa del continuo aumento della popolazione e della crescente domanda di energia, le risorse energetiche rinnovabili diventano la soluzione più conveniente e promettente per soddisfare le esigenze della collettività. La terza fonte di energia rinnovabile attualmente più utilizzata al mondo, dopo quella idroelettrica e quella eolica, è il solare, che presenta tra i suoi numerosi vantaggi la sicurezza, l'affidabilità e l'efficienza. Inoltre, non inquina e può essere ampiamente distribuito, proponendo una prospettiva vantaggiosa per soddisfare le future esigenze energetiche del mondo. Parallelamente allo sviluppo e alla diffusione dell'utilizzo di questa risorsa, anche gli investimenti negli impianti di energia solare e il numero di moduli fotovoltaici sono proliferati notevolmente in tutto il mondo negli ultimi anni. Al contempo anche il quantitativo di pannelli solari di scarto, l'impatto dei quali non è ancora stato soddisfacentemente compreso in termini economici ed ambientali, ha subito una crescita esponenziale.

Mentre il progresso e la ricerca attuale sui pannelli solari si sono concentrati su come migliorare l'efficienza della capacità produttiva degli stessi, allo smantellamento e al riciclo dei moduli a fine vita (EOL) non è ad oggi ancora riservata un'accurata attenzione. Sarebbero proprio queste fasi successive all'utilizzo che potrebbero preservare efficacemente le risorse naturali e ridurre i costi di produzione. È da sottolineare, però, che il fine vita dei pannelli fotovoltaici è un processo complesso che coinvolge una filiera di operazioni specialistiche (raccolta, trasporto, trattamento, dismissione) e dispendiose.

L'obiettivo del presente studio risiede nell'analizzare diverse tecnologie di riciclo dei pannelli fotovoltaici in silicio cristallino, al fine di individuare, dopo una valutazione del loro ciclo di vita, compreso della fase di riciclo, quelle più convenienti dal punto di vista ambientale e della salute umana.

Una prima introduzione presenta la rilevanza del problema di gestione dei moduli fotovoltaici EOL, sia dal punto di vista della salute umana che ambientale, e la dimensione su scala globale della portata del fenomeno, con dei calcoli di previsione dello sviluppo dello stesso nei prossimi tre decenni. A seguire una breve presentazione delle componenti, dei materiali e del funzionamento delle celle fotovoltaiche e dell'impianto nel quale vengono impiegate. Sulla base delle definizioni presenti nel Testo Unico Ambientale e del Decreto Legislativo 49/2014, i moduli fotovoltaici vedono disciplinata la propria gestione e le relative responsabilità dalla normativa inerente i RAEE; esplicitati gli obiettivi della Direttiva EU in termini di sostenibilità e sottolineate le possibili conseguenze della non o mala gestione dei pannelli a fine vita, si analizzano vari processi ed alternative di riciclo dei pannelli fotovoltaici, evidenziandone relativi vantaggi e svantaggi, sulla base delle tecnologie e tecniche impiegate, con relativi materiali di scarto e prodotti in uscita. Particolare attenzione verrà posta alle componenti maggiormente inquinanti e di alto valore, di cui si studiano differenti alternative di recupero e reimpiego. Seguiranno poi le debite conclusioni.

Lo studio è condotto da un'accurata analisi di letteratura integrata con brevetti depositati nella banca dati *Espacenet*, in una parallela ricerca di individuazione degli effetti positivi e negativi delle differenti alternative di trattamento, tramite la valutazione del Life Cycle Assessment.

L'importanza stessa di questa ricerca risiede nella portata del fenomeno di dismissione dei pannelli fotovoltaici a livello globale e nella criticità dello stesso dal punto di vista ambientale e della salute umana, in previsione e considerazione anche dell'elevata quantità di materiale dismesso che si accumulerà entro il 2050.

1. Le caratteristiche dei pannelli fotovoltaici

1. I pannelli fotovoltaici

Nel 1839 il fisico francese Alexandre Edmond Becquerel scopre casualmente che l'influenza dei raggi solari causa lievi flussi ed effetti elettrici su alcuni liquidi. È solo nel 1876, però, che, in seguito a numerosi esperimenti su materiali a stato solido, viene scoperto l'effetto fotovoltaico. Un paio di anni dopo, l'americano Charles Fritts crea il primo rudimentale pannello solare (1879): il selenio, esposto al sole e ricoperto da una sottilissima pellicola semitrasparente d'oro, produce elettricità. Il rendimento è insignificante e non favorisce investimenti in applicazioni pratiche, ma nel 1954, nei Bell Laboratories, gli scienziati Gerald Pearson, Daryl Chapin e Calvin Fuller, realizzano la prima cella solare in silicio capace di generare corrente elettrica misurabile. A partire dagli anni 60 il fotovoltaico trova le prime commercializzazioni e la spinta alla ricerca di nuove fonti di energia alternativa e rinnovabile richiesta dalla crisi petrolifera degli anni 70, favorisce ulteriormente il loro sviluppo.

L'Italia, sin dagli anni 90, è tra i precursori per l'installazione di impianti fotovoltaici, grazie a diversi piani incentivanti attivati nel tempo, come il Conto Energia e la Detrazione Fiscale 50% e a livello mondiale è il terzo Paese per potenza di fotovoltaico installata a fine 2014. Il primo impianto fotovoltaico viene installato nel 1979 al Passo della Mandriola, tra gli Appennini: la potenza è di 1 kW. Le ricerche e lo sviluppo della tecnologia mettono a punto l'efficienza e l'accessibilità dei pannelli, che raggiungono una diffusione esponenziale del 400% negli anni 90-2000.

Sulla base di questo andamento, a partire dai dati presenti in letteratura, si è stimata la possibile dimensione del fenomeno da qui all'anno 2050, considerando la vita media di un impianto fotovoltaico di circa 25-30 anni. Alla fine del 2019 la capacità fotovoltaica cumulativa installata a livello globale ammontava ad oltre 600 GW e si prevede che crescerà ulteriormente fino a 4500 GW entro il 2050. (Md. Shahariar C. et al., 2019)

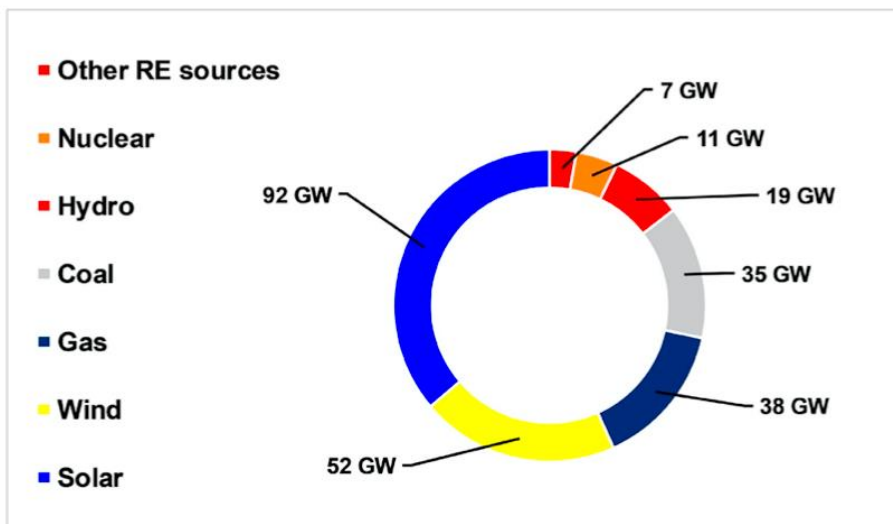


Figura 1.1: Potenza di generazione installata nel 2017, An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling.

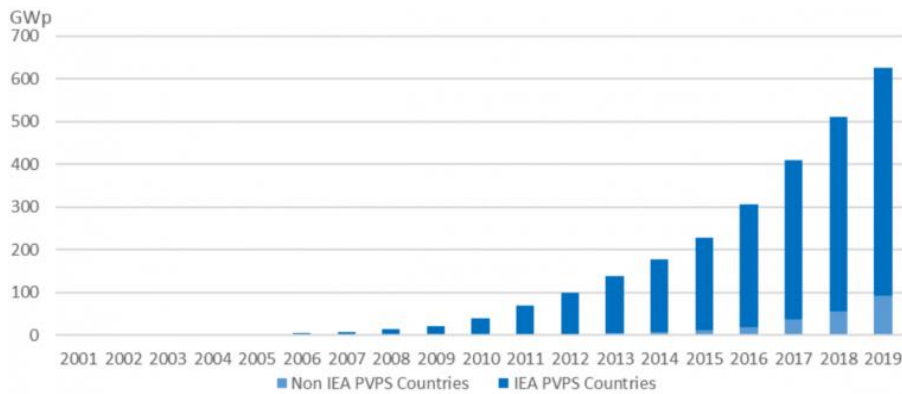


Figura 1.2: Capacità fotovoltaica cumulativa installata a livello globale a fine 2019, IEA PVPS - Snapshot of Global Photovoltaic Markets, 2020.

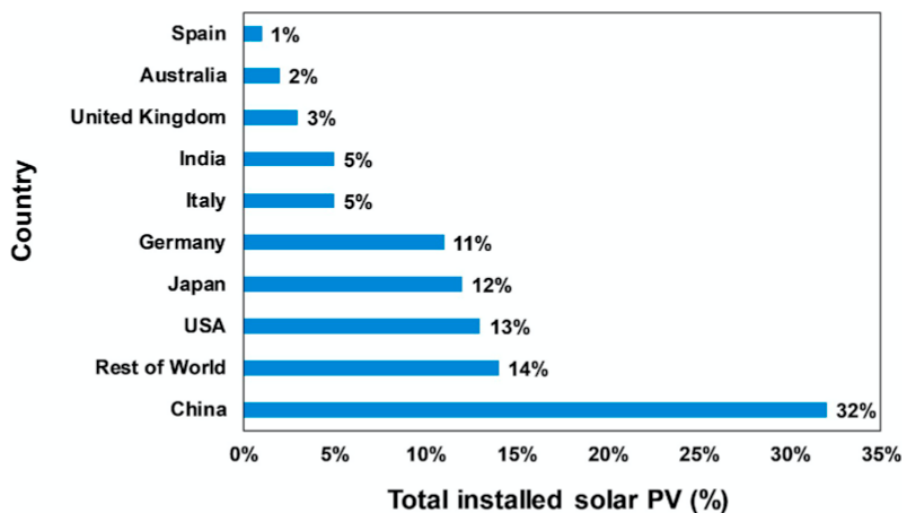


Figura 1.3: I primi 10 paesi al mondo per capacità solare fotovoltaica totale installata alla fine del 2017, An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling.

Ci si focalizzerà in modo particolare sulla realtà italiana.

1.2 La struttura del pannello fotovoltaico

Trattando di pannelli solari bisogna innanzitutto distinguere quelli solari termici da quelli fotovoltaici (FV). Si tratta di due soluzioni diverse accomunate dall'utilizzo della luce solare per produrre energia: il solare termico (detto anche collettore solare) la trasforma in calore, mentre il fotovoltaico la converte in elettricità. In questo elaborato si tratterà dei pannelli solari fotovoltaici.

L'effetto fotovoltaico è il fenomeno fisico che si realizza quando un elettrone presente nella banda di valenza di un materiale (generalmente semiconduttore, come il silicio) passa alla banda di conduzione a causa del surriscaldamento, che comporta l'assorbimento di un fotone sufficientemente energetico incidente sul materiale. (Wikipedia, 2022, A)

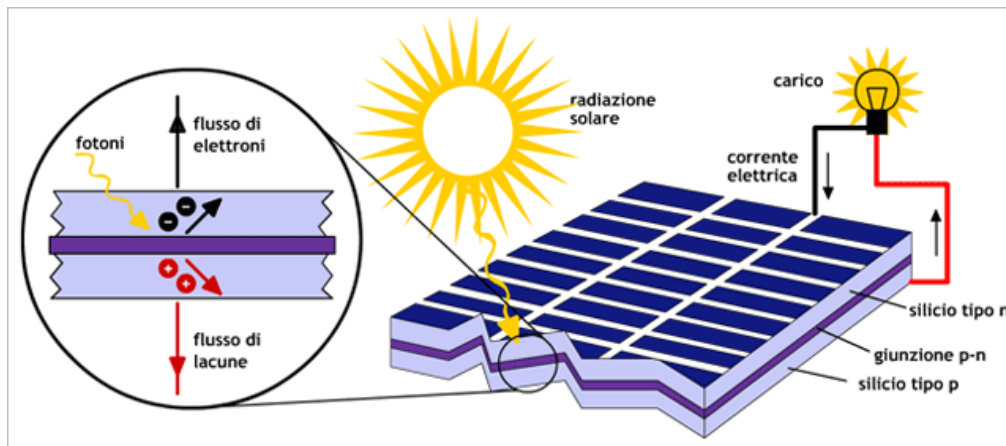


Figura 1.4: Schematizzazione effetto fotovoltaico.

1.2.1 L' impianto fotovoltaico

Un impianto fotovoltaico, che sfrutta suddetto processo, è costituito da diversi elementi, tra cui i Pannelli (o moduli) fotovoltaici, che catturano l'energia del Sole e la trasformano, appunto, in energia elettrica. Ne esistono diverse varianti, ad esempio i monocristallini e i policristallini, che si differenziano principalmente sulla base del loro rendimento. I primi composti da cristalli in silicio orientati tutti nella stessa direzione, permettono al modulo fotovoltaico di produrre più energia quando vengono colpiti perpendicolarmente dalla luce, mentre i pannelli policristallini presentano una disposizione casuale dei cristalli, con un'efficienza invariata durante il corso della giornata. In condizioni di basse temperature e minore intensità solare risultano più efficienti i primi, mentre i policristallini vantano una produttività più elevata in presenza di temperature più alte e maggiore intensità solare (Camilla A., 2022)

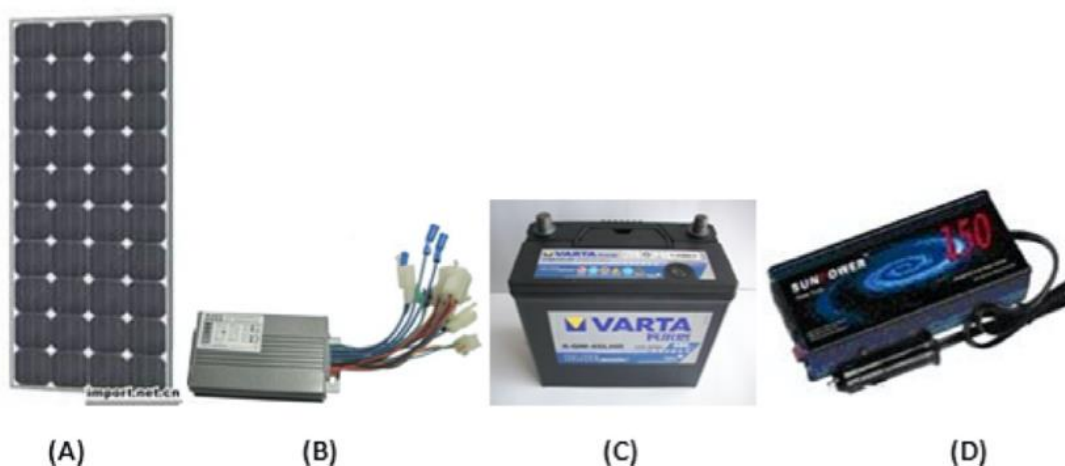


Figura 1.5: Componenti di un impianto solare. (A) pannello solare, (B) regolatore solare, (C) batteria e (D) inverter (necessario se la potenza di uscita è 220 V (AC) o 110 V), Global status of recycling waste solar panels: A review.

1.2.2 Tipologie di pannelli fotovoltaici

I pannelli solari fotovoltaici possono essere classificati in tre generazioni:

1. pannello in silicio cristallino (monocristallino o policristallino);
2. pannello a film sottile (silicio amorfo, tellururo di cadmio, seleniuro di rame indio e gallio - CIGS);
3. pannello fotovoltaico a concentrazione e tecnologie emergenti (pannelli solari CPV, pannelli solari sensibilizzati a coloranti, pannelli solari organici e pannelli ibridi).

Questi pannelli si differenziano sulla base del loro impatto ambientale, efficienza, spazio e costi di installazione della relativa tecnologia. (Valentina D.)

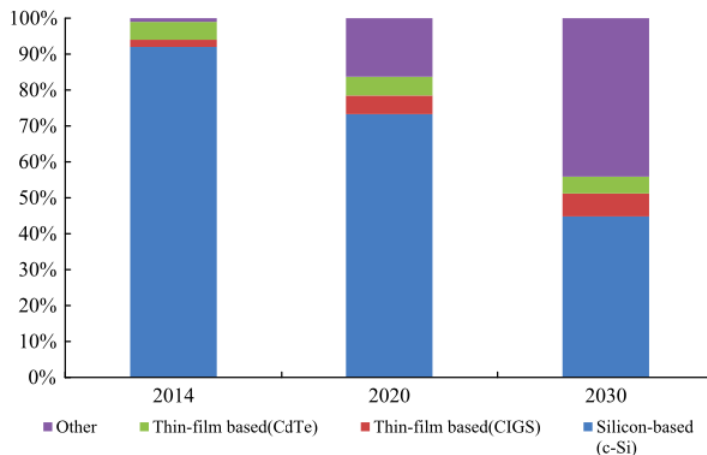


Figura 1.6: Quota di mercato dei pannelli solari per tipo di tecnologia (2014-2030), Global status of recycling waste solar panels: A review.

In questo progetto di ricerca ci si è focalizzati sui pannelli in silicio, la prima generazione, che rappresentano la tecnologia attualmente più diffusa, coinvolgendo il 95,4% del mercato dei pannelli solari (ISE, 2020).

Gli elementi e i materiali che compongono un modulo fotovoltaico, in generale, sono:

- una base di appoggio: in materiale plastico, con funzione di supporto meccanico;
- le celle fotovoltaiche: composte in silicio, materiale semiconduttore, e collegate elettricamente in serie grazie ad un filamento a base di Argento che scorre per tutta la lunghezza di una cella per proseguire poi nella parte posteriore di quella successiva;
- Etilen Vinil Acetato (EVA): materiale polimerico flessibile ed elastico interposto fra la base e la singola cella fotovoltaica che costituisce un ottimo sigillante, impedendo la proliferazione di funghi e batteri e ammorbidendosi facilmente ogni volta che il pannello viene irradiato dai raggi solari. Un altro strato di questo materiale garantisce la perfetta aderenza all'ultimo componente del pannello solare, il vetro temprato;
- il vetro temprato (Backsheet): costituisce il modulo solare. Contiene una bassa quantità di Ferro, in modo da evitare l'assorbimento dei raggi solari utili a un'efficiente produzione di energia fotovoltaica;
- una cornice di alluminio: racchiude tutte le componenti;
- la scatola di giunzione (junction box): posizionata esternamente, svolge funzioni di monitoraggio, sicurezza ed ottimizzazione delle celle fotovoltaiche installate nel modulo.

(Antonioni C., 2022), (Mishra S. et al., 2019)

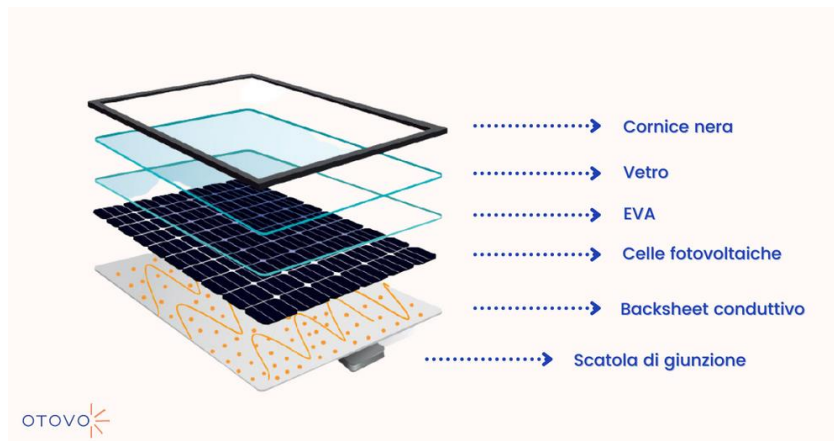


Figura 1.7: Le componenti del pannello fotovoltaico.

1.3 Il problema del fine vita

Sebbene a livello globale si traggano enormi benefici dall'incremento della produzione di energia solare, riducendo drasticamente anche le emissioni di CO₂, i pannelli a fine vita (EOL) costituiscono una fonte di rifiuti pericolosi.

Ci sono diversi fattori che possono concorrere a determinare il fine vita di un pannello FV e si prevede che i relativi rifiuti solari a livello mondiale raggiungeranno tra il 4%-14% di capacità di generazione totale entro il 2030 ed oltre l'80% (circa 78 milioni di tonnellate) entro il 2050.

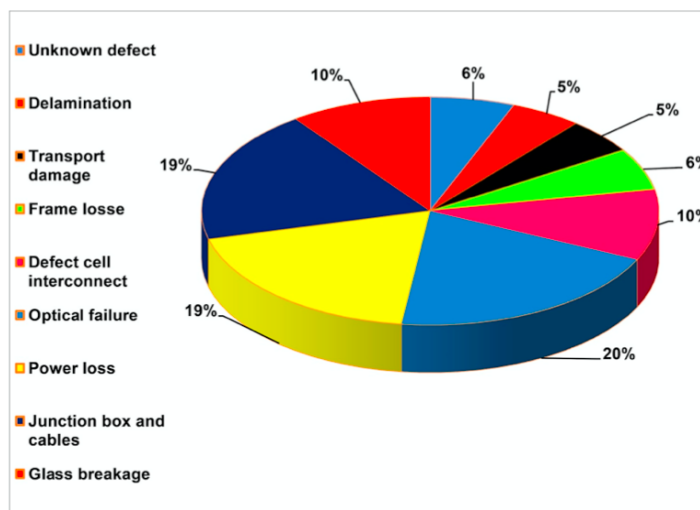


Figura 1.8: Tassi di guasto dei pannelli fotovoltaici in base ai reclami dei clienti, An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling.

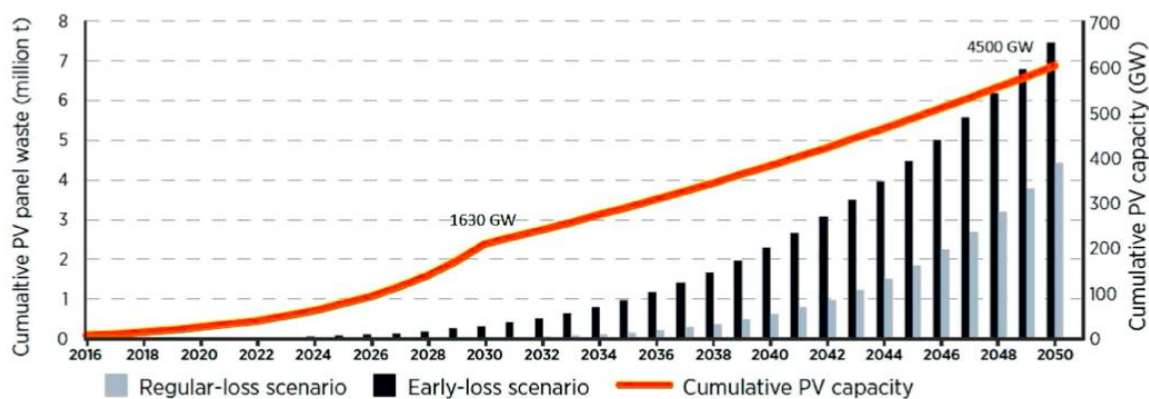


Figura 1.9: La stima cumulativa mondiale dei rifiuti di moduli fotovoltaici solari (tonnellate) 2016-2050, An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling.

La vita di un modulo fotovoltaico può essere suddivisa in tre fasi:

1. costruzione;
2. produzione di energia elettrica;
3. smaltimento.

Le criticità ambientali emergono in modo particolare dal primo e dall'ultimo stadio della lavorazione del modulo FV: durante il processo di estrazione dei materiali che lo compongono e la loro relativa gestione a fine utilizzo.

Materiali	Fase di processo in cui è utilizzato	Effetto sulla salute umana e Organi bersaglio
Arseniuro di Gallio	Celle a concentrazione	Cancerogeno Sangue, reni, polmoni
Cadmio	CdTe e CdS deposizione CdCl ₂ trattamento	Cancerogeno Reni
Cloro-silano	a-Si e c-Si deposizione	Irritante
Diborano Germano Fosfina	a-Si dopaggio, deposizione	Sistema nervoso centrale Sistema gastrointestinale Reni, sangue, polmoni
Ossicloruro di fosforo	c-Si dopaggio	Irritante Reni
Idrogeno silano	a-Si deposizione	Irritante, infiammabile
Fluoruro di idrogeno Tetracloruro di carbonio	Etching	Irritante, cancerogeno, gas serra. Ossa, denti, fegato
Seleniuro di idrogeno Idrogeno solforato	CIS trattamento	Irritante, infiammabile. Sistema nervoso centrale Sistema gastrointestinale
Indio Tellurio Selenio Rame	CIS deposizione	Irritante Fegato, polmoni, ossa Sistema nervoso centrale Sistema gastrointestinale
Piombo Stagno Molibdeno Argento	Contattatura	Sistema nervoso centrale Sistema gastrointestinale Sangue, organi riproduttivi, reni
Acido nitrico Idrossido di sodio	Lavaggio wafer	Irritante, corrosivo

Figura 1.10: Fasi di utilizzazione dei principali elementi contenuti nei pannelli fotovoltaici e loro potenziali effetti sulla salute e sugli organi bersaglio, Elaborazione ENEA su dati Fthenakis, 2003 e Tammaro et al., 2014.

Anche la Federazione Italiana per l'Uso Razionale dell'Energia (FIRE) in una pubblicazione del 2018 "Guida al fine vita degli Impianti Fotovoltaici", ha stimato delle emissioni di CO₂ generate nel corso del ciclo di vita degli impianti (produzione, installazione, manutenzione e dismissione) comprese tra i 35 g di CO₂ eq/kWh (moduli in silicio) e i 15 g di CO₂eq/kWh (moduli a film sottile), dichiarando la fase di produzione come quella di impatto più rilevante, a seguire, lo smaltimento.

Data la portata del fenomeno e la rilevanza della fase seguente l'utilizzo del pannello, risulta necessario provvedere ad una corretta gestione dei pannelli dismessi, sulla base di scelte operative, tecnologiche e strategiche che giocano un ruolo fondamentale per l'ambiente, oltre che per l'economia del Paese.

1.4 Gli obiettivi

La Direttiva EU, così come il Decreto Legislativo n.49 del 14.03.2014 'Attuazione della Direttiva 2012/19/UE sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE)', impone obiettivi ben precisi di recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita.

Nell'allegato V del D.lgs. si fissano i seguenti limiti minimi da applicare ai RAEE trattati a partire dal 15 agosto 2018:

- preparazione per il riutilizzo e il riciclo dell'80% in peso dei moduli gestiti;
- recupero del 85% in peso dei moduli gestiti.

Inoltre, anche se attualmente esenti dalle restrizioni della direttiva RoHS (*Restriction of Hazardous Substances Directive*), le aziende si stanno applicando per sostituire alcune sostanze all'interno dei moduli, in modo da semplificare il processo di riciclo e garantire una significativa riduzione dei rischi annessi, ad esempio utilizzando saldature senza piombo o con concentrazione al di sotto dei limiti della RoHS.

Per rispondere e soddisfare suddetti obiettivi, vi è la necessità di studiare e valutare quali siano i migliori metodi e le tecnologie maggiormente efficaci da applicare ai moduli fotovoltaici, sulla base sia del rendimento del recupero di componenti e del livello di purezza dei materiali sia delle eventuali emissioni e relativi danni ambientali e sulla salute umana generati dai diversi processi sviluppati. Questi gli obiettivi della ricerca.

2. Materiali e Metodi

In questo paragrafo si dichiarano i mezzi utilizzati per ottenere i dati su cui si baseranno i risultati della ricerca discussi nei capitoli successivi.

Come metodo di sviluppo e stesura della ricerca ci si è basati sull'articolo 'Systematic student-driven literature reviews in sustainability science e an effective way to merge research and teaching' di Luederitz et Al. (2016). Questo documento, risultato di sei progetti di ricerca educativa tra l'Università Leuphana di Lüneburg (Germania) e collaborazioni con diverse università, riconosce che la mera analisi di letteratura non comporti la diretta risoluzione di problemi del mondo reale; si pone l'obiettivo di fornire mezzi efficienti ed efficaci per costruire l'alfabetizzazione scientifica. Sulla traccia del percorso suggerito, in una fase di inizio progetto è stata definita l'area di ricerca, su suggerimento della docente ed in linea con l'ambito di studi della laureanda, nonché con le tematiche e problematiche attuali ed emergenti. In seguito, sono stati formulati gli obiettivi dello studio, includendo l'identificazione delle attività chiave e la sequenza di azioni, in una delineazione ben strutturata ed organizzata del percorso da seguire. La fase centrale del progetto ha previsto la ricerca empirica, sviluppata attraverso la definizione

dei criteri di selezione, la raccolta e lo screening dei dati e la revisione del testo completo. A conclusione, attraverso l'analisi qualitativa del contenuto, sono stati interpretati i dati nel contesto del campo di ricerca.

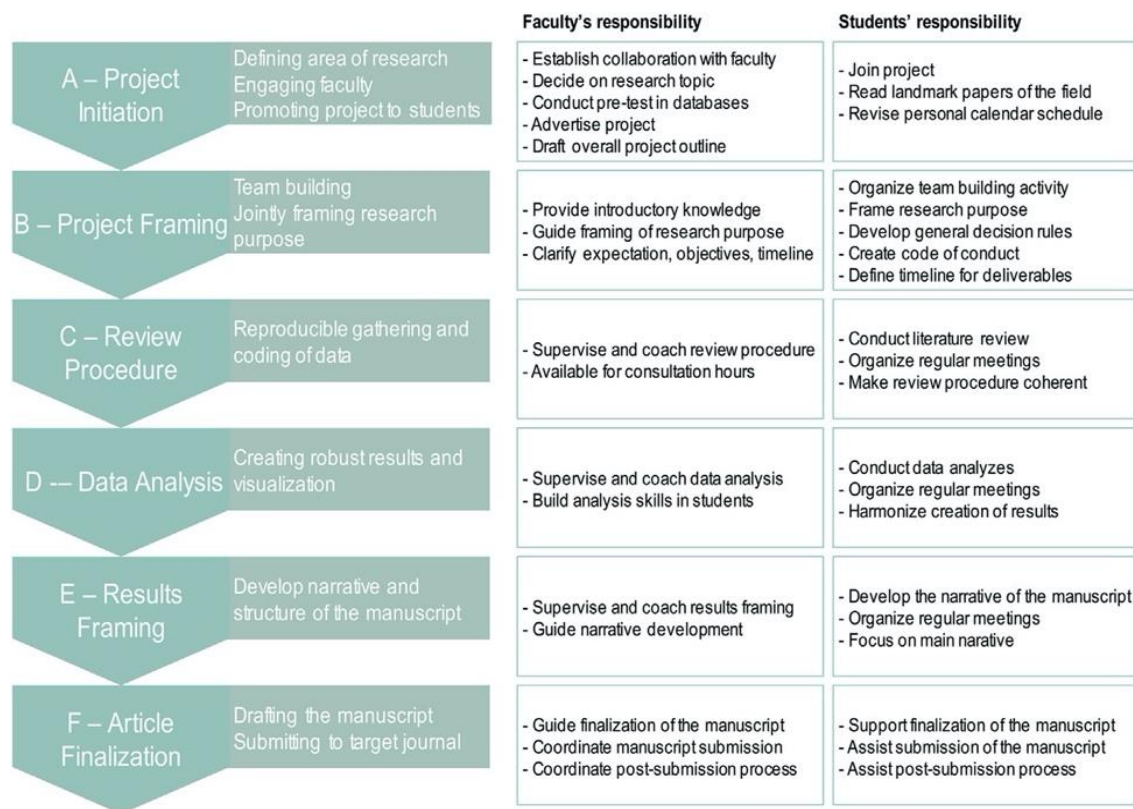


Figura 2.1: Schematizzazione processo di sviluppo dell'analisi di letteratura, Luederitz et al., 2016.

2.1 Analisi dei requisiti legislativi e tecnici

Innanzitutto, si è voluto inquadrare a livello normativo la tipologia di rifiuto proveniente dal pannello fotovoltaico, ricercando le linee guida e le possibilità, ma soprattutto i vincoli imposti per quanto riguarda la gestione dei moduli dismessi, che solo con il D.lgs. 49/2014 sono stati classificati all'interno della categoria dei RAEE non pericolosi e disciplinati di conseguenza. Grazie al Testo Unico Ambientale (T.U.A.), al suddetto D.lgs. 49/2014 e al Disciplinare Tecnico del GSE del Dicembre 2012 sono presentate le diverse strade perseguibili a seconda della tipologia di pannello da gestire e le relative responsabilità di gestione.

2.2 Analisi delle Tecnologie

In un'analisi delle tecnologie esistenti da fonti virtuali quali Wikipedia, FIRE ('Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia'), CORDIS ('Community Research and Development Information Service'), studi universitari e progetti di ricerca internazionali, sono state esaminate le fasi di riciclo dei pannelli, le diverse tipologie di trattamento possibili e i sistemi di processo che, ad oggi, sono risultati industrialmente realizzabili, con le relative considerazioni in merito alla convenienza di determinati trattamenti, in conformità agli obiettivi ambientali prefissati e in vista di una riduzione sempre più accentuata delle risorse impiegate.

2.3 Analisi della Letteratura Scientifica

Lo studio della letteratura ha preso avvio da banche dati e fonti virtuali quali Web of Science, ScienceDirect, Scholar.

Al di là dei filtri per argomento applicati sui siti degli organi di competenza o comunque sensibili alle tematiche trattate, le parole chiave efficaci inserite nel motore di ricerca degli archivi di pubblicazioni scientifiche 'Web of Science' e 'Scholar' sono state: "solar fotovoltaic" "panel cell" "recycling". Dagli output sono stati selezionati documenti sulla base dall'anno di pubblicazione, della nazionalità della fonte, escludendo gli articoli specifici per alcune città extracontinentali. Una cernita finale si è basata sulla lettura degli abstract.

2.4 Analisi dei brevetti

Non volendosi limitare all'analisi di letteratura, lo studio è stato esteso ad alcune proposte di metodi di riciclo dei pannelli fotovoltaici riconosciute attraverso il rilascio di brevetti, intrecciando i risultati ottenuti sui due fronti di ricerca. Ci si è affidati al servizio online gratuito *esp@cenet*, sviluppato dall'Ufficio Europeo dei Brevetti (EPO, 'European Patent Office') insieme agli stati membri dell'Organizzazione Europea dei Brevetti. Ogni stato membro possiede un servizio *esp@cenet* nella sua lingua originale ed ha accesso al database mondiale dell'EPO. Questa banca dati contiene i brevetti nazionali di molti stati europei, nonché i brevetti europei, internazionali e nazionali di altri Paesi. Dato l'elevato numero di brevetti la ricerca per sole parole chiave risulta difficile e talvolta fuorviante. È necessario capire quanti termini usare ed evitare che i risultati di ricerca siano troppi o troppo pochi, combinando i vari tipi di screening offerti dal motore di ricerca:

- * Quick Search - Ricerca semplice
- * Advanced Search - Ricerca avanzata
- * Number Search - Ricerca per numero
- * Classification Search - Ricerca per classi

In primo luogo, è stata eseguita una ricerca semplice, poi una per classi. Sono poi state combinate le due nella ricerca avanzata.

Per una prima ricerca di output sono state selezionate le medesime parole chiave applicate sul portale delle pubblicazioni sfruttato nell'analisi di letteratura: "solar fotovoltaic" "panel cell" "recycling", alla quale è seguita una cernita sulla base dell'anno di pubblicazione. In modo particolare si è scelto di focalizzarsi sui materiali preziosi che, sebbene costituiscano una piccolissima percentuale della composizione dei moduli fotovoltaici, hanno una grande rilevanza economica e soprattutto dal punto di vista ambientale.

2.5 Definizione e scopo della Life Cycle Assessment



Figura 2.2: Rappresentazione del ciclo di vita di un prodotto.

L'analisi del ciclo di vita (LCA) è uno strumento scientifico riconosciuto a livello internazionale che viene utilizzato per quantificare le prestazioni ambientali attribuibili alle diverse fasi di vita di un prodotto (inteso come bene o servizio), comprese le fasi di estrazione delle materie prime necessarie per la produzione dei materiali e dell'energia per la produzione del bene fino alla fase del loro smaltimento finale. Consiste in una metodologia standardizzata che tiene conto di tutti gli input e gli output coinvolti durante la produzione di un prodotto: catena di approvvigionamento, imballaggio, trasporto, uso e della vita. I risultati vengono confrontati sulla base di indicatori che concorrono a identificare le efficienze operative ed ottimizzare la progettazione del prodotto, fornendo al contempo un livello più elevato di trasparenza ambientale.

2.5.1 Fasi di lavoro

A livello internazionale LCA è regolamentata dalle norme ISO della serie 14040, che prevedono le seguenti fasi di lavoro:

1. *Goal and Scope Definition*: definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dell'analisi;
2. *Life Cycle Inventory, LCI*: compilazione di un inventario degli input e degli output di un determinato sistema;
3. *Life Cycle Impact Assessment, LCIA*: valutazione del potenziale impatto ambientale correlato a tali input ed output, sulla base di definite categorie d'impatto (ISO 14042, 2000);
4. *Life Cycle Interpretation*: interpretazione dei risultati (ISO 14043, 2000).

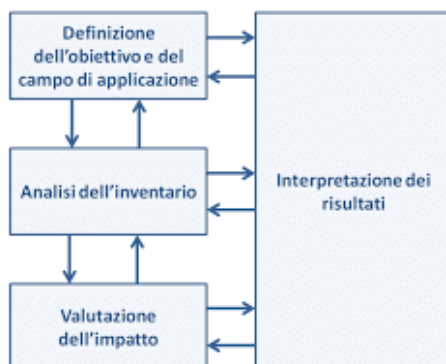


Figura 2.3: LCA framework.

La metodologia LCA appare lo strumento più adeguato a fornire dati ed informazioni necessari a creare modelli analogici della realtà nella fase di progettazione ecosostenibile. In particolare, il suo ruolo risulta cruciale nel definire la minimizzazione dei consumi di materie e di energia e della generazione di emissioni e rifiuti connessi alle diverse fasi di scelta dei materiali, le tecniche costruttive e le modalità di esercizio, nonché di gestione della fase di demolizione e trattamento/smaltimento dei materiali a fine vita. Grazie alla sua natura quantitativa, infatti, l'LCA può esserlo utilizzato per confrontare gli impatti ambientali di diversi processi e sistemi di prodotto e per giudicare quelli migliori per l'ambiente. Ci si propone di utilizzare questo strumento per sviluppare confronti affidabili tra diverse soluzioni progettuali, al fine di quantificarne i carichi ambientali (diretti, indiretti ed evitati) lungo l'intero ciclo di vita, ma anche le prestazioni meccaniche, le condizioni di sicurezza in fase di messa in opera, la potenziale tossicità in fase di uso, la riciclabilità di alcuni materiali, ecc. Lo scopo ultimo è quello di poter operare una successiva gestione degli impatti che sono stati calcolati, tramite una loro riduzione e compensazione.

2.5.2 Limiti

La metodologia LCA presenta dei limiti riguardanti soprattutto la disponibilità di dati completi e precisi, in modo particolare quando ci si rapporta a prodotti nuovi, poiché le informazioni disponibili si basano su banche dati di letteratura preesistenti ed affidabili per un determinato caso in esame, ma non assolute. Questo limite si ripercuote sui risultati, fortemente dipendenti dalla qualità dei dati in input (Hauschild et al., 2018). Anche la completezza può costituire un limite, in quanto richiede semplificazioni e generalizzazioni nella modellizzazione del sistema di prodotto e gli impatti ambientali che impediscono il calcolo della LCA effettivi impatti ambientali. (Hauschild M. Z. et al., 2018)

3. Risultati Analisi della Legislazione e della Normativa

Il quadro legale / regolamentare del recupero e riciclo dei moduli a fine vita

3.1 Definizioni e decreti

3.1.1 Definizioni

Per introdurre alcune tra le proposte di tecniche di gestione del rifiuto fotovoltaico, si prendono in considerazione alcune definizioni di legge funzionali:

- Impatto ambientale: “l'alterazione qualitativa e/o quantitativa dell'ambiente, inteso come sistema di relazioni fra i fattori antropici, fisici, chimici, naturalistici, climatici, paesaggistici, architettonici, culturali ed economici, in conseguenza dell'attuazione sul territorio di piani o programmi o della realizzazione di progetti relativi a particolari impianti, opere o interventi pubblici o privati, nonché della messa in esercizio delle relative attività”. (Il D.lgs. 152/2006 o Testo Unico Ambientale (T.U.A.), art. 5 - punto c)
- Inquinamento: “l'introduzione diretta o indiretta, a seguito di attività umana, di sostanze, vibrazioni, calore o rumore o più in generale di agenti fisici o chimici, nell'aria, nell'acqua o nel suolo, che potrebbero nuocere alla salute umana o alla qualità dell'ambiente, causare il deterioramento dei beni materiali, oppure danni o perturbazioni a valori ricreativi dell'ambiente o ad altri suoi legittimi usi.”

(T.U.A., art. 5)

- **Rifiuti pericolosi:** I rifiuti vengono classificati in relazione alla loro origine (rifiuti urbani, speciali da attività agricola, scavi, lavorazioni industriali ecc.) e composizione. I “rifiuti pericolosi” sono quelli che presentano almeno una delle caratteristiche di cui all’allegato I della parte quarta del presente decreto”.
(T.U.A., parte quarta – art. 184 comma 4)

La classificazione dei rifiuti è effettuata dal produttore che assegna ad essi il competente codice CER in applicazione delle disposizioni contenute nelle decisioni e nei regolamenti UE e delle loro modificazioni.

Rifiuti contraddistinti da “voce a specchio”, possono essere considerati pericolosi o non pericolosi in base ai valori di concentrazione delle sostanze pericolose eventualmente contenute in essi.

Sulla base del principio di precauzione, è opportuno classificare come “rifiuto pericoloso” quel rifiuto che si presuppone contenere sostanze pericolose sulla base del processo produttivo o attività economica dal quale proviene, nel caso in cui non sia possibile effettuare le dovute misurazioni/controlli.

3.1.2 Decreti

Attualmente due terzi dei pannelli immessi sul mercato prevedono l’impiego di silicio cristallino e sono assemblati per circa il 90% con materiali classificati come non pericolosi, quali vetro, alluminio e polimeri. L’imprecisione della stima del quantitativo di metalli e sostanze pericolose contenute nei moduli fotovoltaici deriva dalla rapida evoluzione che la tecnologia ha subito negli ultimi anni.

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

Sin dall’entrata in vigore del primo Conto Energia, un programma europeo di incentivazione della produzione di elettricità da fonte solare mediante impianti fotovoltaici, si è posto il problema dello smaltimento di questi pannelli. Difatti questa iniziativa ha comportato nel 2011 e nel 2012 un incremento esponenziale di installazioni (circa 10 GW in 12 mesi) ed il Gestore Servizi Energetici, il GSE, ha elaborato le istruzioni operative per la gestione e lo smaltimento dei moduli incentivati, attraverso la pubblicazione di un documento relativo ai rifiuti RAEE, Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche, dal titolo: “Istruzioni operative per la gestione e lo smaltimento dei pannelli fotovoltaici incentivati (ai sensi dell’art. 40 del dlgs. 49/2014)”. Tale documento istituisce anche una rete di Consorzi conformi ai requisiti del GSE per il riciclo dei moduli e impone la creazione di fondi Trust in cui versare un contributo per ogni modulo ammesso all’incentivazione dal 2011 (anno del boom) al 2013 (anno di chiusura del Conto energia).

b. Decreto Legislativo n. 49 del 14.03.2014

L’imminente necessità di avviare a recupero i pannelli dismessi, ha posto l’attenzione sulla necessità di attribuire una classificazione a questa tipologia di apparecchiature. In seguito all’emanazione della Direttiva Comunitaria 2002/95/CE e dei suoi aggiornamenti fino alla Direttiva 2011/65/CE (RoHS₂), in Italia entra in vigore il D. Lgs. n.151/2005 e successivamente il D. Lgs. 49/2014 che disciplinano la gestione dei RAEE. Con questi Decreti Legislativi i pannelli fotovoltaici entrano a far parte ufficialmente del novero dei RAEE non pericolosi, con l’obiettivo di massimizzarne il riciclo. (Parlamento Italiano, 2014, A, B)

In Italia la regolamentazione si è estesa a tutti i moduli fotovoltaici installati o da installare.

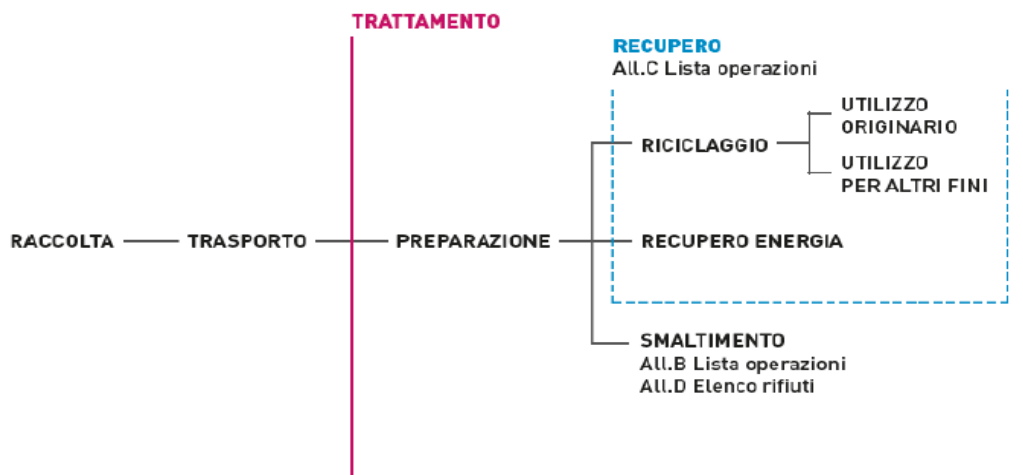


Figura 3.1: Le fasi di gestione dei rifiuti generati dai moduli fotovoltaici a fine vita, D.Lgs. 49/2014.

→ recupero: Secondo la definizione comunitaria di cui all’art. 3 punto 15) della Direttiva Rifiuti n. 98/2008, per recupero deve intendersi “*qualsiasi operazione il cui principale risultato sia di permettere ai rifiuti di svolgere un ruolo utile sostituendo altri materiali che sarebbero stati altrimenti utilizzati per assolvere una particolare funzione o di prepararli ad assolvere tale funzione, all’interno dell’impianto o nell’economia in generale. L’allegato II riporta un elenco non esaustivo di operazioni di recupero*”. (Massimo M.)

→ riciclo: qualsiasi operazione di recupero attraverso cui i rifiuti sono trattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze da utilizzare per la loro funzione originaria o per altri fini. Include il trattamento di materiale organico, ma non il recupero di energia;

→ riutilizzo: qualsiasi operazione attraverso la quale prodotti o componenti che non sono rifiuti sono reimpiegati per la stessa finalità per la quale erano stati concepiti;

→ smaltimento: qualsiasi operazione diversa dal recupero anche quando l’operazione ha come conseguenza secondaria il recupero di sostanze o di energia.

In particolare, il D.Lgs. n.49/2014, in attuazione della Direttiva 2012/19/UE, prospetta due possibili soluzioni per lo smaltimento dei pannelli fotovoltaici:

- i pannelli installati in impianti di potenza inferiore a 10 kW, sono considerati rifiuti domestici e vanno trasferiti ai “Centri di Raccolta”;
- i pannelli fotovoltaici in impianti di potenza nominale superiore o uguale a 10 kW sono considerati, invece, RAEE professionali. Essi devono essere conferiti ad un impianto di trattamento autorizzato, per mezzo di un sistema individuale, collettivo, di soggetti autorizzati per la gestione dei codici CER o di un trasportatore.

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

Finanziamento RAEE					
Storici (AEE prima del 13/03/05) e Moduli FV prima del 28/03/14					
		Moduli FV incentivati			
<ul style="list-style-type: none"> • AEE non FV • Moduli FV non incentivati 		<ul style="list-style-type: none"> • 1°, 2°, 3° CE • 4° CE fino a 30/06/2012 • 4° CE dopo 30/06/2012 e 5° CE solo moduli a concentrazione solare o con caratteristiche innovative 	4° CE dopo 30/06/2012 e 5° CE, escluso moduli a concentrazione solare o con caratteristiche innovative	Immessi nel mercato dal 13/03/05 (escluso moduli incentivati e non incentivati prima del 28/03/14)	
Domestici	Professionali		Disciplinare GSE	Domestici	Professionali
A carico dei produttori presenti sul mercato nello stesso anno in cui si verificano i rispettivi costi, in proporzione alla rispettiva quota di mercato, calcolata in base al peso delle AEE immesse sul mercato per ciascun tipo di apparecchiatura o per ciascun raggruppamento, nell'anno solare di riferimento (art. 23)	A carico del produttore nel caso di fornitura di una nuova AEE in sostituzione di un prodotto di tipo equivalente ovvero è a carico del detentore negli altri casi (art. 24)	Il GSE trattiene dai meccanismi incentivanti negli ultimi dieci anni di diritto all'incentivo una quota finalizzata a garantire la copertura dei costi di gestione dei predetti rifiuti (art. 40)		A carico dei produttori presenti sul mercato nello stesso anno in cui si verificano i rispettivi costi, che possono adempiere in base alle seguenti modalità: a) individualmente, con riferimento ... (omissis) ... al consumo delle proprie AEE; b) mediante un sistema collettivo, in proporzione alla rispettiva quota di mercato, calcolata in base al peso delle AEE immesse sul mercato ... (omissis) ... nell'anno solare di riferimento. (art. 23)	A carico del produttore che ne assume l'onere per le AEE che ha immesso sul mercato (art. 24)

Figura 3.2: Attuazione della direttiva 2012/19/UE sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche, D-lgs. N.49 del 14.03.2014.

La legislazione attualmente vigente accomuna, quindi, i pannelli fotovoltaici ai RAEE, e ne prevede lo smaltimento attraverso procedure codificate. Il riciclo del materiale fotovoltaico, come d'altronde quello di tutti gli altri materiali, è strettamente connesso al rapporto costo/beneficio tra le procedure di raccolta, trattamento, riciclo e smaltimento e la resa in termini produttivi dei materiali recuperati/riciclati. L'articolo 19 del Decreto legge 152/2021, che dispone misure urgenti per l'attuazione del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), impone che il GSE trattienga una garanzia finanziaria nei casi di ammodernamento tecnologico ('revamping') o di ripotenziamento ('repowering') degli impianti fotovoltaici incentivati esistenti. Questi importi prelevati dal GSE garantiscono che i moduli fotovoltaici sostituiti siano smaltiti correttamente: essi saranno restituiti solo dopo una puntuale verifica della documentazione che attesti la avvenuta e corretta gestione del fine vita dei pannelli fotovoltaici dismessi. Le operazioni delle suddette rivalutazioni di impianti esistenti sono sicuramente meno costose di un'installazione ex novo e possono avere un impatto economico rilevante in special modo negli impianti professionali, dove il finanziamento per la gestione del fine vita di apparecchiature e moduli gioca un ruolo cruciale.

3.2 Le responsabilità

In Italia tutti i moduli fotovoltaici installati dopo la data dell'entrata in vigore del D.Lgs. 49/2014, sono gestiti dal GSE (Gestore dei Servizi Energetici S.p.A.) attraverso una serie di consorzi accreditati per il recupero e riciclo dei RAEE fotovoltaici. Questa norma è contenuta nel Collegato Ambientale alla Legge di Stabilità del 2015, che prevede regolamenti di carattere ambientale al fine di promuovere misure di green economy e per il contenimento di un eccessivo utilizzo delle risorse naturali. In base al Disciplinare del GSE, in sequenza di responsabilità, devono occuparsi dell'invio al riciclo dei moduli i produttori/importatori, i distributori o gli installatori e, in caso di loro assenza, il soggetto responsabile dell'impianto in cui i moduli sono installati. (Gestore Servizi Energetici, 2012, A, B) (Angela M.) (Fotovoltaico Norditalia)

Sempre il D.Lgs. 49/2014 (come già la Direttiva 2012/19/UE) indica come responsabili della gestione dei RAEE i produttori/distributori delle apparecchiature stesse, proporzionalmente alla quantità dei nuovi prodotti immessi sul mercato, attraverso l'organizzazione e il finanziamento di sistemi di raccolta, trasporto, trattamento e recupero ambientalmente compatibile dei rifiuti.

Anche il T.U.A. tratta la questione della responsabilità estesa del Produttore (art.178-bis, articolo aggiunto dal comma 1, dell'art.3, Decreto legislativo 3 dicembre 2010, n.205) nel rafforzare la prevenzione della produzione di rifiuti e facilitare l'utilizzo efficiente delle risorse durante l'intero ciclo di vita del prodotto, comprese le fasi di riutilizzo, riciclo e recupero dei rifiuti e di Criteri di priorità nella gestione dei rifiuti (art.179, comma 1) (Parlamento Italiano, 2014, C).

I pannelli provenienti da impianti installati prima del D.lgs. 49/2014 sono considerati in modo differente rispetto a quelli di impianti successivi.

4. Capitolo 4 – Risultati Analisi delle Tecnologie

Il riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita

4.1 I processi di riciclo

In accordo con la gerarchia dei rifiuti, prima di avviare i moduli al riciclo è di certo opportuno valutare la possibilità di riutilizzarli in situazioni di più limitato impiego, come in impianti con tensione di lavoro meno elevata o con spazi di installazione maggiormente estesi. Anche il progetto di delocalizzarli nelle ampie zone dedicate alle discariche sembrerebbe una conveniente ottimizzazione degli spazi e di questi strumenti che potrebbero, sebbene in modo meno efficiente, continuare ad essere produttivi per ancora qualche anno.



Figura 4.1: Gerarchia dei rifiuti.

Passando alla scelta del riciclo, tutte le componenti di un pannello fotovoltaico possono essere trattate separandole e riutilizzando ciascuna delle parti. La quota media di riciclo, individuata misurando il peso del materiale in ingresso nel processo, è tra l'80 ed il 90%. I vari metalli, come l'alluminio delle cornici e dei telai dei moduli, il vetro, i cavi e la plastica vengono separati meccanicamente e riciclati attraverso le normali linee di riciclo. Da un modulo standard di 21 kg si possono recuperare circa 15 kg di vetro, 2,8 kg di plastica, 2 kg di alluminio, 1 kg di polvere di silicio e 0,14 kg di rame. Con le nuove tecnologie da poco introdotte risulta vantaggioso sostituire i vecchi moduli con quelli di ultima generazione che garantiscono

efficienze maggiori, tenendo però in considerazione che il disassemblaggio dei moduli è un'operazione complicata, dal momento che la loro struttura è progettata per resistere ai fenomeni atmosferici. (Economia circolare, 2022)

4.1.1 Fasi di riciclo

Le fasi per riciclare il classico modulo in silicio sono principalmente tre:

1. preparazione e rimozione meccanica del telaio in alluminio e della scatola di giunzione. Separazione dell'EVA, vetro e Tedlar dalle celle, con processo termico (svantaggio: emissione di gas) o chimico;
2. triturazione del materiale;
3. separazione dei materiali e lavorazione nelle già esistenti linee di riciclo del vetro e dei semiconduttori. Per purificare il silicio dallo strato antiriflesso, dai metalli e dai semiconduttori si ricorre ad un trattamento chimico o ad una purificazione mediante laser (svantaggio: elevato costo, basse efficienze e tempi lunghi) o trattamento chimico (svantaggio: difficoltà di scegliere composizione, concentrazione e temperatura ottimale).

Da questo processo di scomposizione si ricavano metalli ferrosi, metalli non ferrosi, vetro, silicio e plastica. Ognuna di queste componenti può essere rilavorata o riutilizzata per creare nuovi prodotti e nuove materie prime:

- il vetro ricavato viene miscelato con altri scarti di vetro, di altre provenienze, e riutilizzato in fibre di vetro o prodotti per l'isolamento o per imballi;
- i metalli, il silicio e la plastica possono essere utilizzati per la produzione di nuove materie prime.

Relativamente all'ambito di nostro interesse, l'allegato C alla parte quarta T.U.A. fornisce una definizione delle possibili operazioni di recupero/ riciclo di:

- sostanze organiche non utilizzate come solventi (comprese le operazioni di compostaggio e altre trasformazioni biologiche);
- metalli e composti metallici;
- altre sostanze inorganiche;
- prodotti provenienti dai catalizzatori.

Fondamentali sono anche le operazioni di smaltimento dei residui che sopravvivono ai processi di recupero/riutilizzo (T.U.A. – Parte quarta, Allegato B):

- deposito sul o nel suolo (ad esempio discarica);
- trattamento fisico-chimico che dia origine a composti o a miscugli eliminati secondo uno di specificati procedimenti (ad esempio evaporazione, essiccazione, calcinazione);
- raggruppamento preliminare prima di una delle operazioni (escluso il deposito temporaneo, prima della raccolta, nel luogo in cui sono prodotti i rifiuti).

4.1.2 Tipologie di trattamento

I processi a cui sono sottoposti i pannelli fotovoltaici a fine vita descritti in letteratura sono di numerosi tipi e in molti casi si alternano fra loro, fino al recupero/trattamento completo dei pannelli. È possibile raggruppare le tipologie di trattamento in quattro grandi categorie:

- Processi fisici: trattamenti meccanici che provvedono alla frantumazione mediante schiacciamento o attrito; per separare i componenti può essere utilizzata la flottazione o la sabbiatura sottovuoto. Questi metodi possono essere utilizzati per concentrare argento e silicio e per ridurre il consumo di reagenti chimici. Mediante separazione puramente meccanica, i principali componenti dei pannelli c-Si, inclusi vetro, alluminio e rame, possono essere recuperati con rese cumulative superiori all'85% rispetto alla massa del pannello. Si tratta di procedure poco costose che consentono il recupero diretto del vetro;
- Processi termici, ad esempio la delaminazione, che sfrutta le alte temperature per decomporre l'EVA e facilitare la susseguente separazione meccanica tra il vetro e il silicio delle celle solari. Alcuni tra questi processi raggiungono gli 800°C e tempi di esposizione prolungati, prevedendo un consumo energetico notevole e non risultando, così, né economicamente, né ecologicamente convenienti;
- Processi chimici: alcuni prevedono la dissoluzione dell'EVA per contatto con solventi organici. Se i solventi utilizzati in questi processi non vengono riutilizzati ulteriormente, possono originare una notevole quantità di rifiuti liquidi organici volatili che sono molto difficili da trattare e possono rappresentare una possibile fonte di impatto ambientale rilevante. I processi di tipo chimico vengono sfruttati soprattutto per il recupero di materie prime-seconde di elevato valore economico, come l'argento.
- Processi fisico-chimici applicati per la dissoluzione dell'EVA in una combinazione di un solvente organico e l'applicazione di ultrasuoni, oppure il trattamento mediante calore e poi mediante l'utilizzo di un solvente per recuperare i metalli preziosi presenti nei pannelli fotovoltaici. Si tratta, però, di altri processi che richiedono un utilizzo energetico molto elevato.

4.1.3 Sistemi per il riciclo

Attualmente sono solo tre i sistemi per il riciclo dei pannelli fotovoltaici ad essere risultati industrialmente realizzabili:

- 1) Il **processo Deutsche Solar**, organizzato in due fasi principali: un trattamento termico finalizzato al disassemblaggio dei componenti e un trattamento chimico per la rimozione delle impurità e l'ottenimento del silicio.
 - a. Nella prima fase di processo la cornice viene separata manualmente e i moduli vengono messi in un forno a 600 °C dove i componenti plastici (EVA e Tedlar) si decompongono; anche il vetro viene separato manualmente. I gas emessi sono trattati in un post-combustore e depurati mediante un sistema di abbattimento delle sostanze inquinanti. La lastra di vetro rivestita dallo strato di materiale semiconduttore è sottoposta ad un processo di sabbiatura e le polveri fini che si formano sono aspirate e trattate.
 - b. Nella parte chimica del trattamento vengono rimossi lo strato di metallizzazione superiore e posteriore, lo strato di rivestimento antiriflettente e la giunzione che rivestono il wafer. L'operazione consiste in bagni con l'utilizzo di diversi composti che dipendono dai materiali utilizzati per la costruzione della cella: i solventi principalmente utilizzati sono acido fluoridrico (HF), acido nitrico (HNO₃), acido acetico (CH₃COOH) ed il perossido di idrogeno (H₂O₂).

Questo processo chimico dà come risultato un fango ricco di sostanze chimiche che viene poi smaltito, mentre l'acqua utilizzata per il risciacquo è trattata presso impianti di purificazione. La Deutsche Solar è una compagnia industriale affiliata al gruppo

SolarWord, il cui obiettivo industriale è focalizzato principalmente sul recupero del silicio, proveniente sia dai pannelli fotovoltaici a fine vita che dai pannelli danneggiati. In termini di resa, Deutsche Solar dichiara che il semiconduttore viene riciclato al 73%, di cui 59% con grado di purezza del 99,9999%, mentre il vetro viene riciclato al 94% e risulta idoneo alla produzione di vetro float. La percentuale recuperata in massa è pari al 95,7%, con un elevato grado di purezza delle singole frazioni di materiali. Tuttavia, uno svantaggio di questo processo è l'alto tasso di manualità presente nel ciclo produttivo che ne limita i profitti economici e i ritmi di produzione, determinando un alto costo energetico. Inoltre, non esiste un metodo universale per il trattamento chimico: le celle solari di produttori differenti necessitano di trattamenti specifici. È necessario anche prevedere dei metodi di trattamento e smaltimento delle acque reflue.

- 2) Il **processo First Solar**, specifico per i pannelli in cadmio-tellurio che si sviluppa in due fasi:
- a. la frantumazione;
 - b. il trattamento dei liquidi.

- 3) Il **processo RESOLVED**, basato su trattamenti meccanici “ad umido” che consiste in un ciclo chiuso a due vie (Figura), una delle quali utilizzabile per il trattamento di moduli sia integri che danneggiati, l'altra per i moduli danneggiati e gli scarti di produzione.

- a. Nel primo percorso, i moduli intatti e gli scarti di produzione sono sottoposti inizialmente ad un trattamento termico (450-500 °C) che avvia il processo di disassemblaggio, distruggendo lo strato di EVA e separando tra loro le lastre di vetro. Un particolare processo di sabbiatura rimuove lo strato di semiconduttore e gli altri strati metallici presenti sulla superficie vetrosa (Vacuum Blasting) e il vetro ripulito viene inviato ai sistemi di riciclo tradizionali. Le polveri risultanti dall'abrasione, invece, che contengono materiale semiconduttore, abrasivo e vetroso, vengono trattate attraverso processi meccanici ad umido (flottazione), al fine di raccogliere i materiali di valore (CdTe o CIS) in un preconcentrato.
- b. Nel secondo percorso i moduli vengono sottoposti ad un processo di frantumazione ('crushing') in pezzi di piccole dimensioni in un mulino a martelli. Nel materiale frantumato sono presenti frammenti grossolani di EVA e pezzi di vetro di diversa granulometria, con superficie ricoperta di materiale semiconduttore. A questa fase segue quindi un trattamento meccanico ad umido (Wet-Mechanical Treatment Attrition) che, attraverso un sistema di miscelazione ad alta energia rimuove lo strato semiconduttore dai frammenti, permettendo il recupero dei materiali di alto valore. Il vantaggio principale di questa fase è che non necessita di alcuna sostanza chimica. Con questo trattamento, i materiali fotoattivi, assieme a particelle molto fini di vetro, vengono rimossi dal substrato vetroso, mentre i pezzi di vetro più grossolani possono essere inviati al riciclo.

Vi sono poi due fasi, comuni ad entrambi i cicli, nelle quali si aumenta la concentrazione dei materiali, che si separano. Per ottenere un concentrato di materiale semiconduttore da avviare alla purificazione finale si sfrutta la flottazione (Wet-Mechanical Treatment Flotation), un processo meccanico ad umido che consente l'allontanamento di particelle da una miscela. La schiuma ottenuta, ricca dei materiali di maggior valore, viene purificata per via idrometallurgica attraverso la lisciviazione con composti acidi, fino a raggiungere materiali fotoattivi con un grado di purezza (99,999%). Le particelle fini di vetro, invece, si depositano sul fondo durante la fase di flottazione e vengono avviate al comune riciclo dei residui vetrosi.

Gli impatti ambientali potenzialmente derivanti dalle diverse fasi relative al processo di riciclo dei pannelli messo a punto nell'ambito del progetto RESOLVED sono la dispersione in ambiente di acqua contaminata da metalli e la possibile emissione di composti acidi, di polveri di silicio, fumi ed altri contaminanti. È pertanto necessaria la presenza di sistemi di abbattimento di questi fumi e di smaltimento degli eventuali filtri. (Carrabba P. et al., 2020)

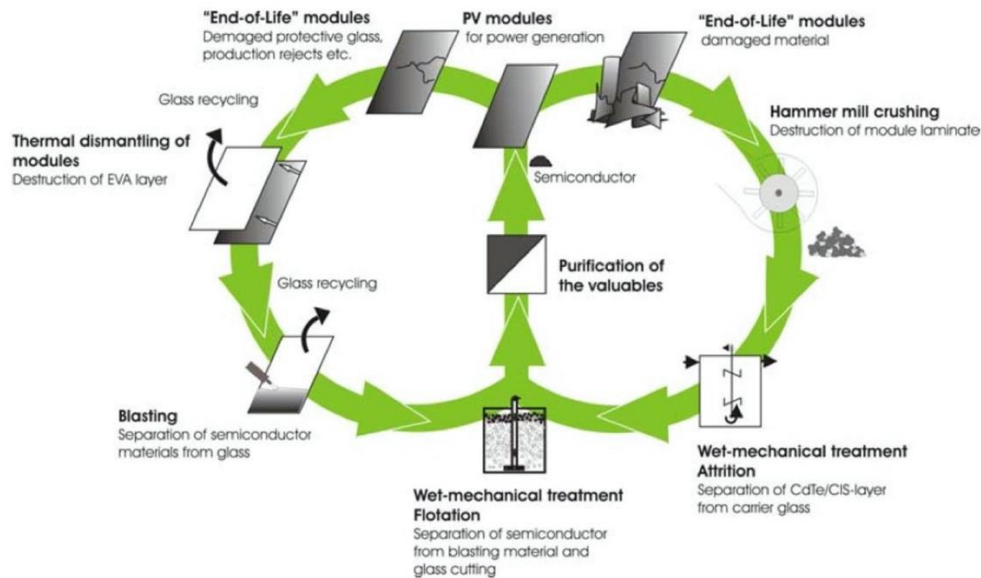


Figura 4.2: Strategia di riciclo a ciclo chiuso per i moduli a film sottile messa a punto nel progetto Resolved, (Saverio P., 2011).

4.2 I vantaggi economici ed ambientali legati al riciclo

Nonostante la frenata registrata dalle fonti rinnovabili in Italia negli ultimi anni, al nostro Paese spetta ancora il primato mondiale nel fotovoltaico: circa l'8% della nostra domanda elettrica è soddisfatta dal sole, una quota che non conosce rivale tra gli altri grandi paesi del globo. Nonostante questo incoraggiante risultato, non esiste ancora una filiera industriale sul territorio, lacuna cui solo adesso si sta tentando di rimediare con grande ritardo. Secondo alcuni gestori di stabilimenti di trattamento, i processi di applicazione di tecniche e procedimenti per il riciclo dei moduli fotovoltaici possono essere efficacemente ed economicamente attuati a patto che ci sia un volume adeguato di unità da trattare. Si parla di un quantitativo superiore a circa 8.000 tonnellate/annue (più di circa 140 MW/anno), ma dal momento che ad oggi questi volumi non sono ancora stati raggiunti, i moduli vengono trattati solo parzialmente (solo per le operazioni meno costose); il resto del rifiuto viene accantonato in attesa che si raggiunga un volume adeguato al trattamento da effettuare; il problema, quindi, si ritiene non sia tecnologico bensì di quantità. Come riportato dal rapporto di IRENA (International Renewable Energy Agency), però, con il quantitativo di pannelli dismessi che si accumuleranno in vista del 2050, sarà possibile ricostruire 2 miliardi di nuovi moduli, generando un giro di affari di 15 miliardi di dollari, comportando la rivalutazione del 'problema' dello smaltimento in 'business' (Luigi S.) (Greenreport, 2017, A). È importante anche sottolineare che il periodo di ammortamento, noto anche come periodo di pareggio o EPBT (Energy Payback Time) del profitto apportato dallo sfruttamento del principio fotovoltaico in relazione all'investimento a monte dell'installazione, si sta gradualmente contraendo grazie al continuo sviluppo della tecnologia, compensando in

un tempo sempre minore i costi di produzione iniziali (FIRE, 2022) (Md. Shahariar C. et al., 2019).

Il Rapporto “End of Life Management – Solar Photovoltaic Panel” pubblicato dall’International Renewable Energy Agency (IRENA) nel 2016 afferma che una gestione del fine vita dei sistemi fotovoltaici con recupero dei materiali riciclabili è preferibile, in termini di impatto ambientale, al semplice smaltimento. Il riciclo non solo riduce i rifiuti e le relative emissioni dannose nell’ambiente, ma anche il consumo di energia e le emissioni relative alla produzione dei nuovi pannelli. Particolarmente in relazione alle materie prime ad alto contenuto di impurità (ad esempio i precursori di materiali semiconduttori), che spesso richiedono un pretrattamento ad alta intensità energetica per raggiungere i livelli di purezza richiesti. Riportando un esempio concreto, una centrale elettrica convenzionale da 2,6 MW genera un volume annuo di circa 1480-2220 tonnellate di CO₂ equivalenti che potrebbe essere risparmiato riciclando 186 tonnellate di rifiuti solari fotovoltaici. Un tale risparmio avrebbe un notevole impatto positivo sull'ambiente e ridurrebbe le emissioni da produzione di energia di circa 49470 tonnellate di CO₂ eq oltre i 20 anni di vita di una centrale. È stato stimato che la produzione di un impianto di generazione convenzionale da 1903 MW sarebbe equivalente a riciclare 1480 tonnellate di rifiuti solari fotovoltaici e ridurrebbe le emissioni di circa 11840-17760 tonnellate di CO₂ eq nel corso della vita dell'impianto: un risparmio pari a 396770 tonnellate di CO₂ eq. (Md. Shahariar C. et al., 2019). Non solo il valore economico quindi, ma anche gli impatti ambientali degli effluenti minerari per scavare i metalli componenti i moduli FV causano problemi di emissione e la maggiore richiesta di energia per svolgere queste attività stimola la ricerca di risorse energetiche nuove e rinnovabili, tra cui l’energia solare. Quest’ultima può essere assorbita e trasformata attraverso i moduli fotovoltaici, che contengono vetro e tre metalli principali. L’esigenza di questi materiali innesca la necessità di scavi ed emissioni minerarie di metalli, in una eterna reazione a catena.

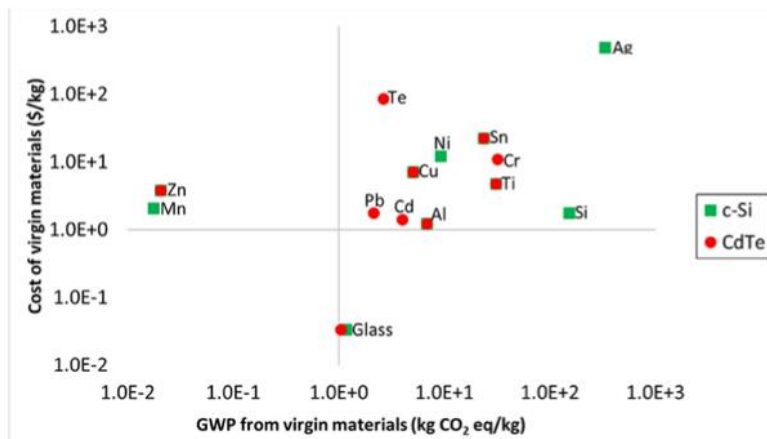


Figura 4.3: Costo delle materie vergini (\$/kg) Vs GWP delle materie vergini kgCO₂/kg, espresso in scala logaritmica, Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-Si) and cadmium telluride (CDTE) solar panels.

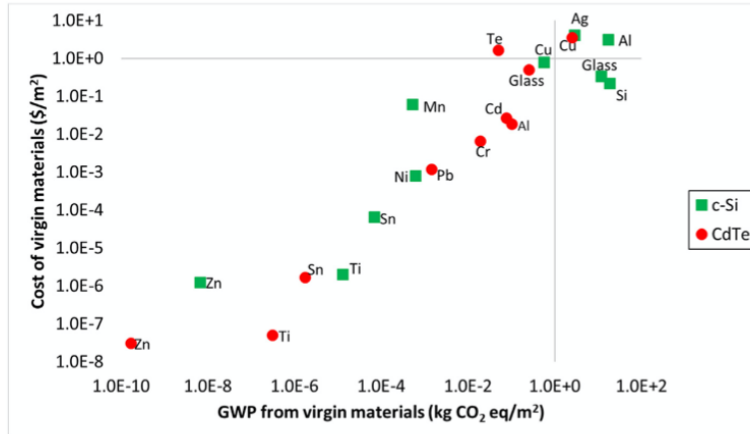


Figura 4.4: Costo delle materie vergini (\$/m²) Vs GWP da materie vergini kgCO₂/m², espresso in scala logaritmica, Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-SI) and cadmium telluride (CDTE) solar panels.

4.3 Il potenziale danno ecologico del mancato riciclo dei pannelli fotovoltaici

Per fare una stima di emissione in ambiente dei componenti dei pannelli fotovoltaici, vi è la necessità di valutare la possibilità di dispersione nell'ambiente degli elementi chimici in essi contenuti. The International Renewable Energy Agency (IRENA) riporta i potenziali percorsi di mobilitazione di questi, al fine di identificare i potenziali pericoli per l'ambiente e la salute umana originati dalla gestione del fine vita del fotovoltaico.

Sulla base di informazioni riscontrabili in letteratura, si stima il potenziale danno ecologico nel tempo, considerando in particolare:

- emissioni tossiche;
- rischi per la salute e la sicurezza;
- energy Pay back time;
- emissione di gas serra;
- pericolo di lisciviazione elementi tossici.

Il rischio legato al rilascio nell'ambiente dei materiali e dei 58 composti contenuti nei pannelli, soprattutto durante la fase di dismissione e trattamento è consistente, ed è quindi necessario definire le opportune misure di contenimento.

Lo studio di IRENA

Lo studio di IRENA si è sviluppato nei seguenti punti:

1. quantificazione della produzione dei rifiuti da fotovoltaico (MW-t) nel periodo 2012-2050 in Italia → la stima (anno 2016) ammonta a 7.245.850 di tonnellate prodotte nel periodo 2016-2050;

	Produzione di rifiuti (MW) per tecnologia					Produzione di rifiuti (t) per tecnologia				
	c-Si	a-Si	Cd-Te	CIGS	Emerging CVP	c-Si	a-Si	Cd-Te	CIGS	Emerging CVP
TOT	4352	571	785	999	428	1783268	649261	634973	740135	171460

Figura 4.5: Stima (MW/t) di fotovoltaico dismessi nel periodo 2012-2050, Elaborazione ENEA da Paiano, 2015.

2. definizione dell'elenco degli elementi/sostanze contenute all'interno delle diverse tipologie di pannello fotovoltaico, la loro percentuale di presenza, la percentuale di riciclabilità (differente in base ai metodi applicati);
3. individuazione dei principali percorsi di mobilizzazione dei componenti e dei materiali presenti, al fine di identificare i potenziali pericoli per l'ambiente e la salute umana originati dalla gestione del fine vita del fotovoltaico. Si è scelto di analizzare l'aspetto della possibile lisciviazione di sostanze, sulla base degli studi di IRENA (2016), BIO Intelligence Service (2011) e di Tammaro et al. (2016);
4. quantificazione della potenziale lisciviazione (24 h) ($\mu\text{g/L}$) di elementi pericolosi, a seguito:
 - a) dell'abbandono tal quale nell'ambiente (modalità NF = Non Filtrato);
 - b) al conferimento tal quale in discarica (modalità F = Filtrato);
5. applicazione dei calcoli alla quantità di rifiuti prodotta in Italia nel periodo 2012-2050 per l'individuazione di quattro differenti scenari di emissione al 2050 di alcuni elementi chimici contenuti nei pannelli fotovoltaici (Cadmio, al Cromo, al Piombo e al Nichel), caratterizzati da un elevato impatto sul comparto ambientale e sulla salute umana.

I metodi di lisciviazione permettono di determinare il tenore della presenza di elementi disciolti in acqua, rapportato ai limiti di legge che variano a seconda delle legislazioni nazionali. Allo scopo di misurare proprio la possibile liberazione in ambiente di elementi potenzialmente tossici dai pannelli fotovoltaici dismessi, Tammaro et al. (Parikh S., 2015) attraverso un esperimento in laboratorio hanno misurato la possibile lisciviazione degli elementi chimici contenuti in un certo numero di campioni di celle fotovoltaiche al Silicio cristallino (c-Si), confrontando i dati di 26 campioni di pannelli, di costruzione compresa tra il 1985 e il 2012. La composizione dei pannelli è molto varia, a causa delle modalità costruttive relazionate anche alla provenienza geografica e delle modificazioni nel tempo subite dalle tecnologie considerate. Il test di lisciviazione è stato attuato secondo la procedura standard italiana ed europea, che prevede l'utilizzo di acqua pura e una esposizione per 24 h. I campioni così ottenuti sono stati analizzati sia in modo diretto (campioni non filtrati - NF), sia filtrati (F) attraverso una membrana di acetato di cellulosa da $0,45\mu\text{m}$, ricercando gli elementi potenzialmente rilasciabili nell'ambiente che ragionevolmente si poteva pensare di trovare. I campioni non filtrati rappresentano, nelle intenzioni dei ricercatori, il caso peggiore possibile, da intendersi come abbandono incontrollato dei pannelli rotti nell'ambiente, mentre i rilasci misurati attraverso filtrazione sono paragonati a rilasci in ambiente di discarica controllata, in considerazione delle modalità contenitive con cui queste sono usualmente realizzate. I risultati ottenuti, espressi in $\mu\text{g/L}$, sono stati successivamente confrontati con i limiti di legge previsti per i contenuti in metalli per l'acqua potabile (DW – Limiti europei – Direttiva 98/83/EC) e per l'acqua proveniente da uso urbano e industriale e smaltibile tal quale al suolo (WS – T.U.A.).

c-Si	Al	Cr	Mn	Cu	Cd	Pb	Se	Sn	Zn	Te	Sb	Ag	Mo	Ba	Ni
Law limit (µg/L)	200/1000	50/1000	50/200	1000/100	5/-	10/100	10/2	-/3000	-/500	-/-	5/-	-/-	-/-	-/-	20/200
non filtrato	20/26	0/26	0/26	0/26	4/26	18/26	4/26	0/26	0/26	0/26	9/26	0/26	0/26	0/26	2/26
filtrato	12/26	0/26	0/26	0/26	3/26	15/26	3/26	0/26	0/26	0/26	3/26	0/26	0/26	0/26	2/26
N° campioni positivi n.f.	26/26	16/26	16/26	14/26	6/26	24/26	4/26	23/26	26/26	3/26	15/26	14/26	1/26	23/26	20/26
%	100%	62%	62%	54%	23%	92%	15%	88%	100%	12%	58%	54%	4%	88%	77%
N° campioni positivi f.	26/26	10/26	6/26	11/26	11/26	26/26	6/26	16/26	22/26	7/26	14/26	11/26	8/26	12/26	9/26
%	100%	38%	23%	42%	42%	100%	23%	62%	85%	27%	54%	42%	31%	46%	35%

Figura 4.6: Dati di lisciviazione (µg/L) per campioni provenienti da 26 pannelli di tipo c-Si. Le celle evidenziate in grigio riportano il numero di campioni che superano i limiti di legge per l'elemento considerato. Law limit = Limiti di legge = Direttiva 98/83/EC e T.U.A.; 0 = dati minori di 3,0 µg/L, Elaborazione ENEA da Tammaro et al., 2016.

I limiti di legge riportati nelle tabelle sono:

- carattere sottolineato = Direttiva 98/83/EC, relativa ai limiti di sostanze nell'acqua potabile;
- carattere grassetto = T.U.A., relativo ai limiti di sostanze contenute in acqua riversabile tal quale nei suoli. Lo zero indica dati inferiori ai 3,0 µg/L;
- Non filtrato = n° di campioni non filtrati sul totale che superano il limite di legge;
- Filtrato = n° di campioni filtrati sul totale che superano il limite di legge;
- N° campioni positivi NF e F riporta invece il numero di campioni risultati positivi all'elemento chimico ricercato, pur essendo le quantità riscontrate inferiori ai limiti di legge.

Dalla tabella si evince che Cromo, Manganese, Rame, Stagno, Tellurio, Zinco, Argento, Molibdeno e Bario rispettano sempre i limiti di legge, in percentuali variabili. Alluminio, Cadmio, Piombo, Selenio, Antimonio e Nichel, invece, superano spesso i valori di estremità accettabili. In particolare, il Piombo è contenuto nel 100% dei campioni analizzati filtrati e nel 92% di quelli non filtrati e rappresenta il maggior pericolo di dispersione con quantità che superano abbondantemente tutti gli altri elementi. Alcuni materiali sono presenti in percentuali molto basse e l'opportunità del loro recupero sarà legata, quindi, non solo alla possibilità tecnica, ma anche al costo/beneficio del processo, in termini economici, oltre che ambientali. Si deve considerare, inoltre, che la metodologia utilizzata da Tammaro et al. (2016) riporta dati di lisciviazione riferibili ad una esposizione dei frammenti di pannelli per una durata di 24 h, per cui i quantitativi di sostanza (µg/L) individuati si riferiscono a questo arco temporale. Rielaborando i dati relativi ai µg/L dei diversi elementi lisciviati, riportati da Tammaro et al. (2016) con i dati della tabella relativi alle stime di tonnellate di rifiuti fotovoltaici dismessi nel periodo 2012-2050 (Paiano, 2015), si ottiene una stima dei potenziali rilasci negli anni degli elementi chimici contenuti nei pannelli c-Si nel caso di un abbandono tal quale nell'ambiente (paragonabile alla modalità non filtrata – NF) e di uno smaltimento in discarica (paragonabile alla modalità filtrata – F).

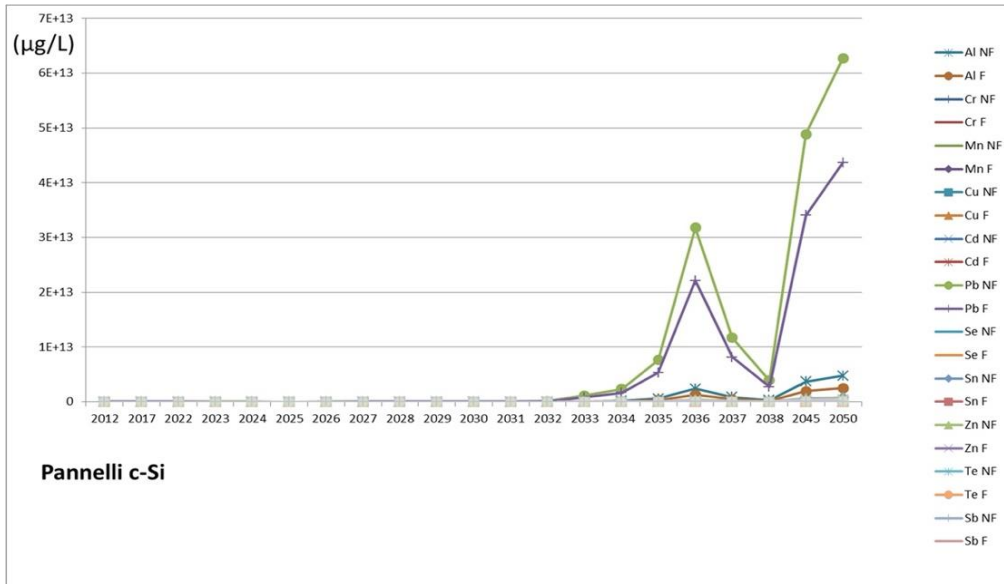


Figura 4.7: Dati di dispersione in ambiente tramite lisciviazione dei singoli elementi chimici contenuti nei pannelli c-Si. Proiezione al 2050. F = Filtrato; NF = Non Filtrato.

Si è cercato, a questo punto, di valutare la possibile dispersione in ambiente di quattro elementi (Cadmio, Cromo, Nichel e Piombo), derivanti dalla dismissione dei pannelli fotovoltaici installati in Italia (c- Si), secondo quattro differenti ipotesi di smaltimento:

- “Worst scenario” (WS): abbandono dei rifiuti tal quale in natura (= “non filtrato”);
- “Intermediate I” (I-I): smaltimento in discarica (= “filtrato”);
- “Intermediate II” (I-II): riciclo del 30% dei pannelli a fine vita;
- “Best scenario” (BS): riciclo del 90% dei pannelli a fine vita.

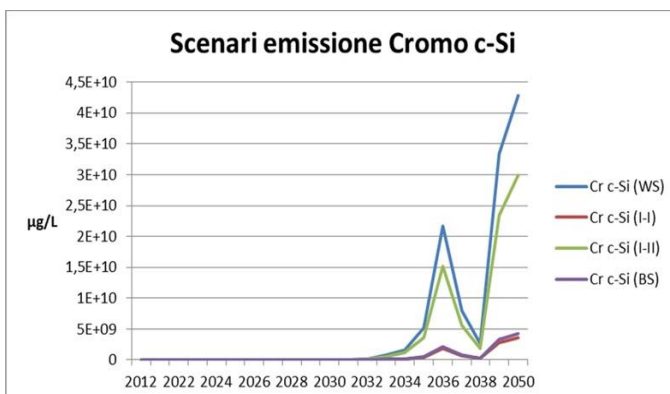


Figura 4.8: Scenari di emissione relativi al Cromo (c-Si).

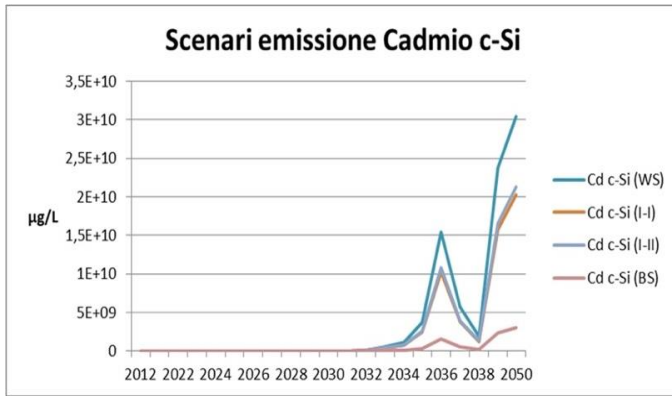


Figura 4.9: Scenari di emissione relativi al Cadmio (c-Si).

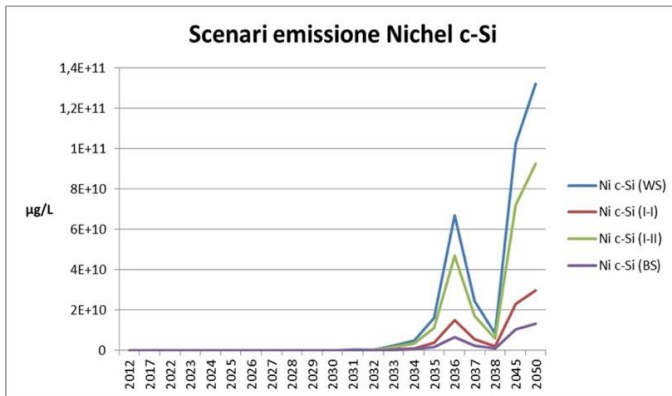


Figura 4.10: Scenari di emissione relativi al Nichel (c-Si).

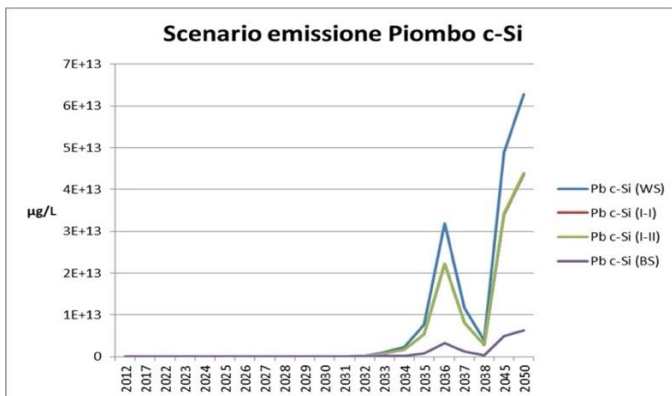


Figura 4.11: Scenari di emissione relativi al Piombo (c-Si).

Questo studio ha permesso di approfondire gli aspetti legati all'impatto ambientale e sulla salute del fine vita dei pannelli fotovoltaici. Indipendentemente dalla convenienza economica del recupero a fini del riutilizzo degli elementi analizzati, si è visto come il BS permetta, in vista del 2050, di abbattere l'emissione in ambiente degli elementi considerati in modo molto efficace, lì dove gli scenari intermedi (I-I e I-II) non raggiungono, per lo più, risultati soddisfacenti. In modo particolare, sia il cromo che il piombo risultano abbattibili nel lisciviato mediante l'utilizzo di opportuni metodi di filtrazione, oltre che attraverso un riciclo diretto delle componenti contenenti piombo.

5. Risultati analisi della letteratura

Gli input selezionati nella ricerca attraverso la Letteratura Scientifica e la scrematura sulla base dall'anno di pubblicazione hanno prodotto un totale di 12 risultati, con articoli dal 2011 ad oggi per quanto riguarda l'archivio di Web of Science. Sulla base dei titoli degli elaborati (alcuni specifici per determinate città extracontinentali) è stata eseguita manualmente una cernita ulteriore, per poi selezionare le pubblicazioni aderenti allo studio, attraverso la lettura degli abstract (5 pubblicazioni).

Nella banca dati 'Scholar', invece, in risposta al medesimo input si ottengono più di un centinaio di risultati, ma scegliendo come tipologia di pubblicazione gli articoli scientifici, il numero di documenti si restringe a 76. Focalizzandosi sugli esiti delle ricerche ad accesso libero degli ultimi 4 anni, si prendono visione dei titoli di 24 documenti, sottoposti ad un'ulteriore selezione sulla base della pertinenza all'obiettivo della ricerca.

Documents by type

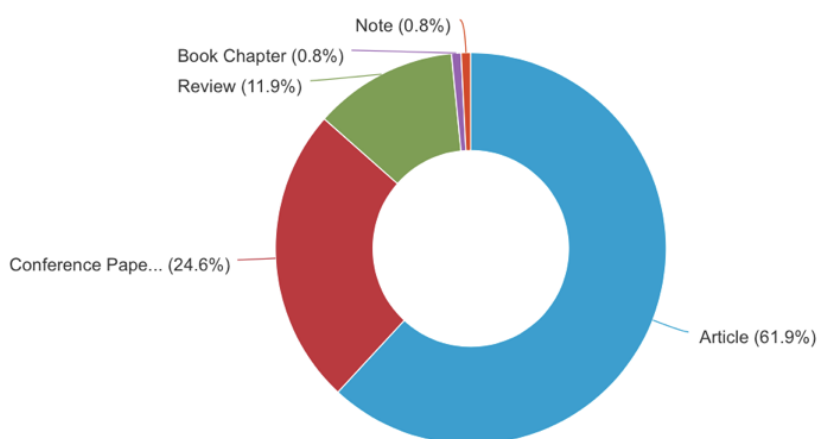


Figura 5.1: Diverse tipologie di pubblicazioni sulla banca dati 'Scholar' in risposta agli input "solar photovoltaic" "panel cell" "recycling".

Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.

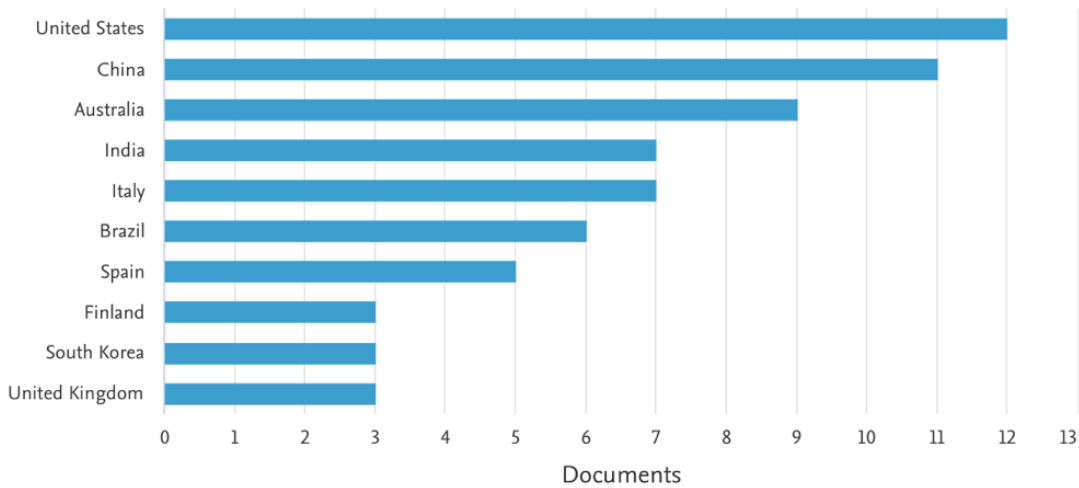


Figura 5.2: Città di provenienza delle pubblicazioni sulla banca dati ‘Scholar’ in risposta agli input "solar fotovoltaic" "panel cell" "recycling".

Documents by year

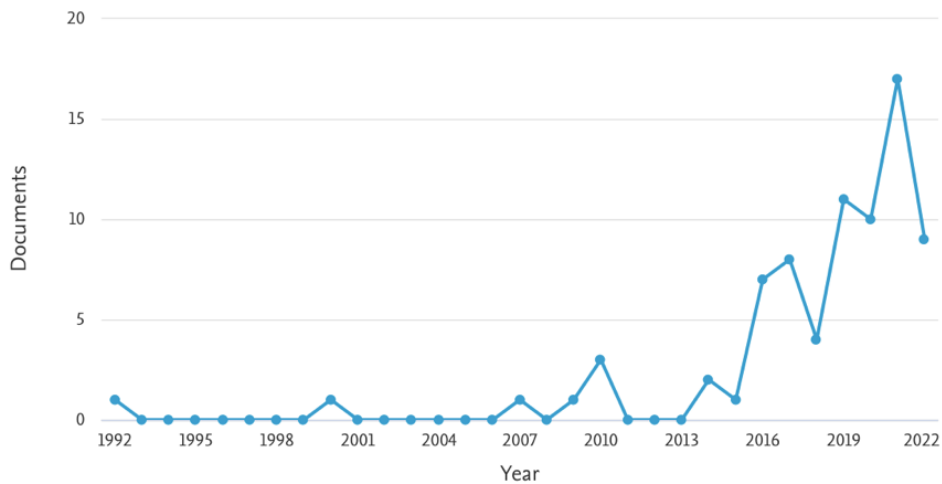


Figura 5.3: Distribuzione temporale delle pubblicazioni sulla banca dati ‘Scholar’ in risposta agli input "solar fotovoltaic" "panel cell" "recycling".

TITOLO	RIVISTA	ANNO	AUTORE/I	LINK
Global status of recycling waste solar panels: A review	Elsevier - Waste Management	2018	Yan Xu, Jinhui Li, Quanyin Tan, Anesia Lauren Peters, Congren Yang	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X18300576?via%3Dihub
Environmental impacts of recycling	Elsevier - Total Environm	2020	Thomas Maani, Ilke Celik, Michael J.Heben,	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720323445

crystalline silicon (c-SI) and cadmium telluride (CDTE) solar panels	ental Science		Randall J.Ellingsonc, Defne Apula	
Potential environmental hazards of photovoltaic panel disposal: Discussion of Tamarro et al. A Life Cycle Assessment of a recovery process from End-of-Life Photovoltaic Panels	Elsevier - Journal of Hazardous Materials	2015	Parikhith Sinha	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389416303624
An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling	Elsevier - Energy strategy reviews	2019	Md. Shahariar Chowdhury, Kazi Sajedur Rahman, Tanjia Chowdhury,	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X19301245
Solar photovoltaic panels as next generation waste: a review	Biointerfa ce research in Applied Chemistry	2019	Sunanda Mishra1, Prasant Kumar Rout2, Alok Prasad Das1	https://biointerfaceresearch.com/wp-content/uploads/2019/10/2069583796539546.pdf
Experimental, economic and life cycle assessments of recycling end-of-life monocrystalline silicon photovoltaic modules	Elsevier - Journal of Cleaner Production	2022	Mitchell Shyan Wei Lim, Dong He, Jasmine Sie Ming Tiong, Svenja Hanson, Thomas Chung-Kuang Yang , Timm Joyce Tiong , Guan-Ting Pan , Siewhui Chong	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622004346
Recycling WEEE: Extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon	Elsevier - Waste Management	2016	Pablo Dias, Selene Javimczik, Mariana Benevit, Hugo Veit, Andréa Moura Bernardes	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X16301015

photovoltaic
modules,

Tabella 5.4: Tabella riferimenti degli articoli principali sui quali si è basata la ricerca.

Gli impatti ambientali del riciclo dei pannelli solari in silicio cristallino (c-Si)

5.2 Una valutazione del ciclo di vita dei pannelli solari in silicio cristallino (c-Si)

Coem già ribadito, indubbio aspetto positivo è il fatto che lo sfruttamento del sistema fotovoltaico permette di ridurre il quantitativo di gas serra emesso dalla produzione in generale di energia. Attraverso una valutazione LCA, è emerso che la fase di riciclo contribuisce al 13-25% dell'intero ciclo di vita del fotovoltaico. Inoltre, i metodi a base termica hanno comportato in generale impatti ambientali inferiori rispetto ai metodi chimici e meccanici (ad eccezione per il processo di pirolisi). I risultati hanno identificato, inoltre, i materiali dai quali si traggono i maggiori benefici economici ed ambientali a seguito delle operazioni di riciclo: Ag, Al, Si e vetro.

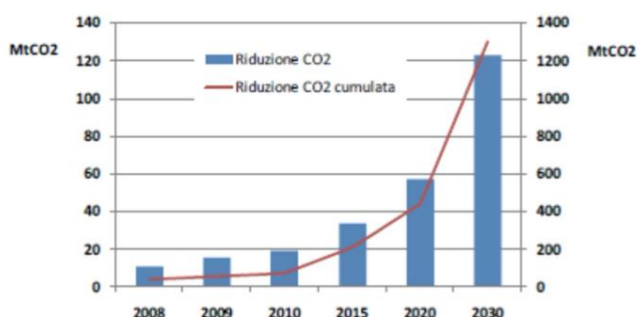


Figura 5.5: Stima delle emissioni di CO₂ evitate a livello globale (2008-2030) mediante l'utilizzo dell'energia prodotta mediante fotovoltaico (FIRE, 2018)

5.2.1 Valutazione delle emissioni di GHG ('Greenhouse gas') degli impianti fotovoltaici e conseguente riscaldamento globale

Prima di esaminare la stima delle varie emissioni inquinanti prodotte step by step durante il ciclo di vita dei moduli FV in esame (c-Si), si sottolinea che i suddetti pannelli, appartenenti alla prima generazione, risultano essere quelli più inquinanti, con una media emissiva di 34,5 g CO₂-eq/kWh, sia rispetto a quelli a Tellurio di Cadmio (19,39 g CO₂-eq/kWh) e a quelli a Silicio amorfo (20,5 g CO₂-eq/kWh). Le differenze emerse nei risultati, dovute a:

- i differenti materiali e processi costruttivi utilizzati;
- le diverse prestazioni in termini di efficienza;
- il sito, le dimensioni dell'impianto e la sua longevità;

sono state evidenziate da un lavoro di 23 studi ad opera di Nugent e Sovacool (2014) sul lifecycle dei pannelli che ha preso in considerazione 4 fasi: l'estrazione e la fabbricazione, l'installazione, la vita operativa ed il mantenimento, il fine vita. (Daniel N. et al., 2014)

Il potenziale di riscaldamento globale (GWP) è un indicatore connesso alle emissioni e sviluppato per rappresentare l'impatto relativo sul clima di diversi gas o processi a effetto serra: misura quanta energia assorbirà l'emissione di 1 tonnellata di gas serra in un dato periodo di tempo, in genere 100 anni, relativi alle emissioni di 1 tonnellata di CO₂. Confrontando il GWP tra il riciclo ed il conferimento in discarica di pannelli solari fotovoltaici EOL, si riscontra che emissioni del processo di riciclo (25 kg CO₂-eq) sono cinque volte inferiori a quelle della discarica (121 kg CO₂-eq), principalmente per l'influenza positiva del recupero di plastica ed alluminio. Nei processi di riciclo del solare fotovoltaico EoL, i principali contributori al GWP sono le emissioni derivanti dai trasporti e dal consumo di elettricità, che ammontano rispettivamente a 56,5 e 35,3 kg di CO₂-eq. In discarica, invece, l'impatto dell'incenerimento della plastica (46 kg CO₂-eq) è il più rilevante, e rappresenta il 38% degli impatti totali del GWP. D'altra parte, però, il riciclo aumenta i valori di potenziale di tossicità per l'uomo e di ecotossicità dell'acqua dolce a causa delle acque reflue prodotte e delle sostanze chimiche utilizzate. Al fine di mitigare questi, è necessario studiare strategie di trattamento sostenibili delle acque e valutare l'utilizzo di altre sostanze chimiche o ridimensionare i loro dosaggi. (Mitchell S. et al., 2022)

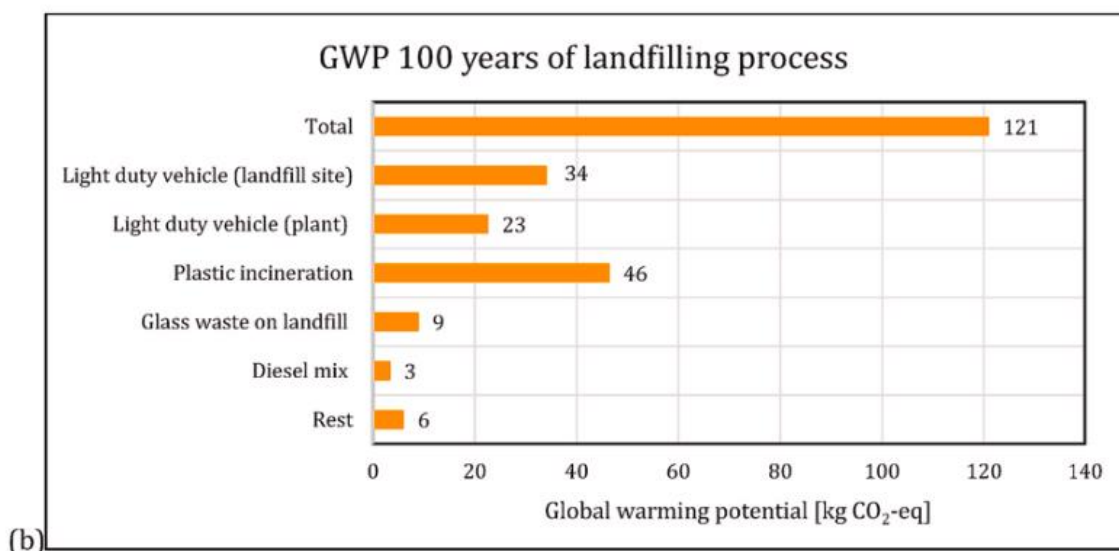
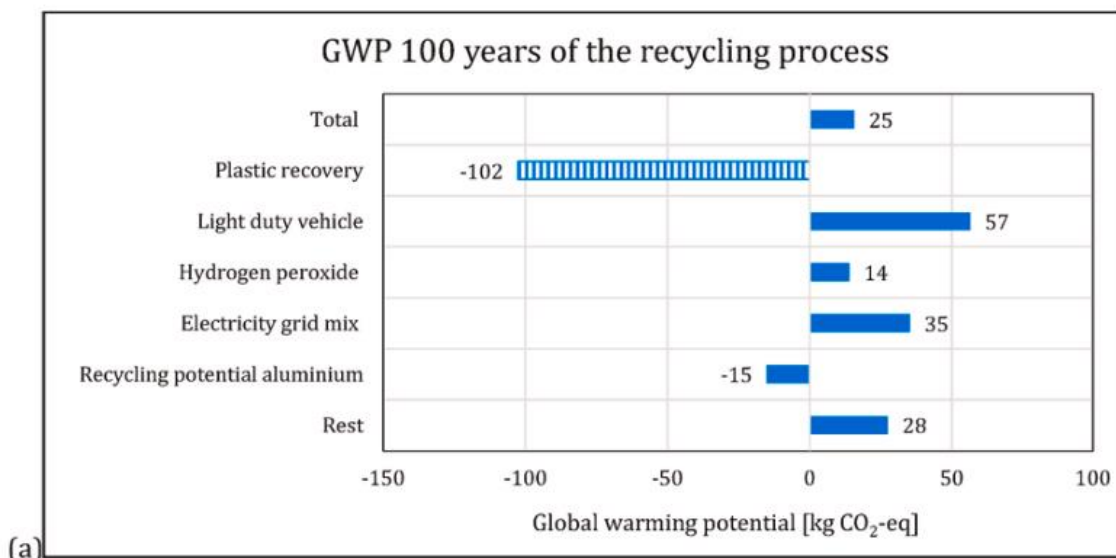


Figura 5.6: Risultati del potenziale di riscaldamento globale del (a) processo di riciclo e (b) del processo di messa in discarica. (I crediti osservati come valori negativi rappresentano gli impatti evitati).

5.2.2 Progetti Europei e confronto delle Tecnologie di riciclo dei pannelli fotovoltaici

In ambito di Economia Circolare, l'Enea (Agenzia Nazionale per l'Efficienza Energetica), sulla base di un'iniziativa di 8 aziende europee ed istituti di ricerca, ha già avviato il progetto 'ReSIELP' (Recovery of Silicon and other materials from End-of-Life Photovoltaic Panels) con l'obiettivo di recuperare l'85% dei moduli fotovoltaici, sfruttando tecnologie innovative. I materiali di interesse dell'iniziativa, per di più economicamente preziosi, sono in particolare il rame, l'alluminio, il vetro, l'argento e il silicio. (Resielp, 2022)

Anche il Progetto EU SENSE (Sustainability evaluation of solar energy systems), coordinato dall'Università di Stoccarda e finanziato dal 'Programme for research, technological development and demonstration on Energy, environment and sustainable development, 1998-2002' ha analizzato il ciclo di vita di tre differenti tipologie di celle solari, tra cui quelle in silicio. Cominciato nel 2003 e terminato nel 2006, il progetto è stato finalizzato ad individuare il tipo di vantaggio derivato da un corretto riciclo delle componenti, basandosi su dati di partenza reali di linee di produzione e non su simulazioni.

Un approccio "gate to gate" è stato utilizzato per indagare su due linee di attività:

- a) la linea Recovery, dedicata al recupero di materie prime secondarie dai pannelli fotovoltaici EoL c-Si, quali alluminio, rame, vetro, argento e silicio;
- b) la linea Glass reuse, per l'impiego del vetro recuperato in componenti edili prefabbricati.

Il risultato vuole evidenziare il consumo di energia, prodotti chimici e trasporti, al fine di confrontarli con i potenziali benefici ambientali ottenuti grazie al recupero dell'alluminio, nella misura maggiore. Ci si è concentrati su dieci punti medi ambientali delle categorie di impatto che sono state identificate come più rilevanti per il processo di riciclo dei pannelli fotovoltaici EoL c-Si, selezionando come classi: riscaldamento globale (GW), formazione di particolato fine (PMF), formazione di ozono (OF), acidificazione terrestre (TA), eutrofizzazione in acqua dolce (FE), eutrofizzazione marina (ME), tossicità cancerogena per l'uomo (HCT), scarsità di risorse minerali (MRS), scarsità di risorse fossili (FRS), consumo di acqua (WD). (Thomas M. et al, 2020)

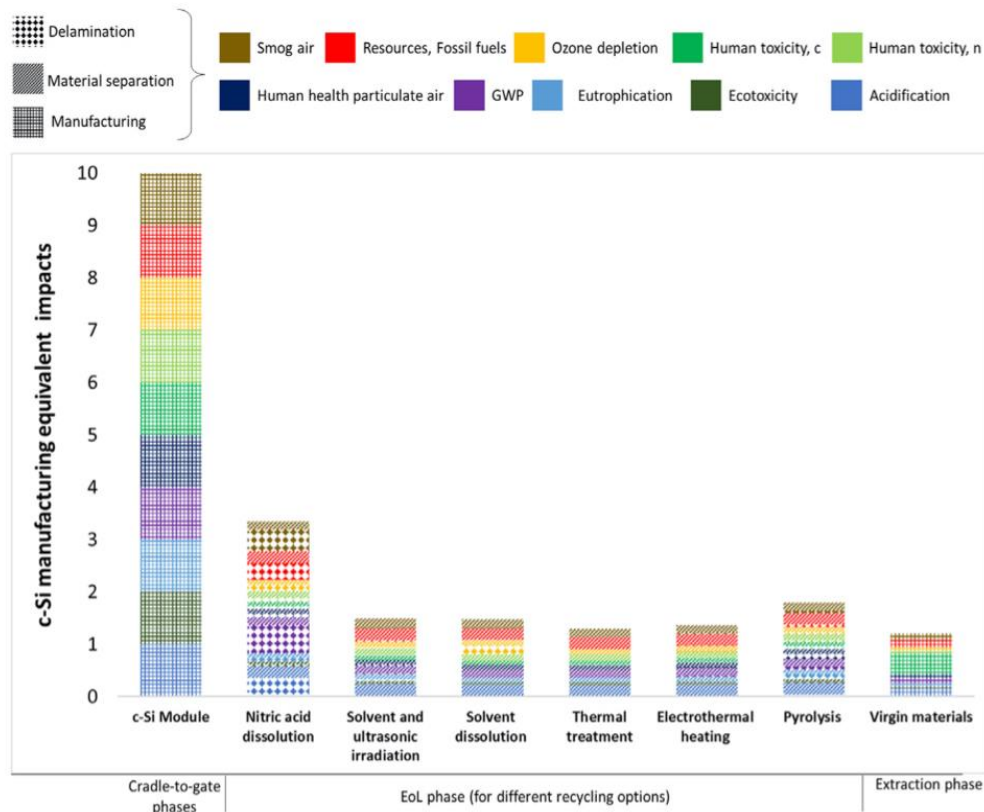


Figura 5.7: Confronto dei risultati dell'impatto per la delaminazione del c-Si con la separazione del materiale (attacco chimico) incorporato in ciascun metodo. All'interno di ciascuna categoria di impatto, l'impatto (per m² di pannello riciclato) da ciascun processo è stato diviso per l'impatto della produzione di c-Si. Per c-Si l'altezza della barra è l'unità per ogni categoria di impatto. Per dieci categorie di impatto, l'impatto totale per c-Si è dato come dieci unità. (Thomas M. et al., 2020)

La Figura mostra gli impatti ambientali totali normalizzati dei pannelli fotovoltaici durante le varie fasi del loro ciclo di vita, le diverse opzioni di gestione EoL del riciclo fotovoltaico e la fase di estrazione dei materiali vergini necessari alla costruzione dei moduli. La normalizzazione è stata eseguita assumendo che tutte le categorie di impatto abbiano implicitamente la stessa importanza (1 unità di impatto di fabbricazione c-Si). L'impatto del riciclo sull'intero ciclo di vita degli impatti dei c-Si PV risulta variare del 15–25% a seconda della tecnica di riciclo scelta. Emerge che l'irradiazione ultrasonica con solvente, la dissoluzione con solvente, il trattamento termico, il riscaldamento elettrotermico e la pirólisi hanno impatti nell'intervallo dal 13 al 20% di quelli totali di produzione, mentre la dissoluzione dell'acido nitrico raggiunge circa il 33% del totale degli impatti produttivi. Il motivo principale di questo alto contributo è l'utilizzo di grandi quantità di sostanze chimiche. Inoltre, i processi a monte necessari per la produzione dell'acido comportano il rilascio di più sostanze come composti organici volatili (COV) e particolato nell'aria rispetto ai processi a monte per la produzione di energia elettrica; queste sostanze possono avere un effetto negativo sulla qualità dell'aria locale come lo smog fotochimico, mentre alcune emissioni, come l'anidride carbonica (CO₂), protossido di azoto (N₂O), ozono e vapore acqueo, agiscono come "gas serra", contribuendo all'effetto del riscaldamento globale. L'irradiazione con solventi e ultrasuoni risulta altamente ecotossica, mentre il trattamento termico e il riscaldamento elettrotermico

sono meno dannosi rispetto ai metodi chimici, dovuto all'utilizzo di elettricità come unica risorsa. Il processo di pirolisi, invece, richiede un maggiore apporto di energia per raggiungere le alte temperature richieste dal processo.

Attraverso le tabelle seguenti, si evidenzieranno gli aspetti positivi e negativi delle varie tecniche di processo applicabili al fine di recuperare le diverse componenti dei pannelli.

passo di reciclo #Pannello	Processi di riciclaggio e loro stato	Materiali	Ingressi (per m ²)	Uscite	Vantaggi	Svantaggi	
c-Si	Delaminazione	Dissoluzione dell'acido nitrico» (Brutone, 2020)	HNO ₃ Elettricità	46,2 kg 0,45 kWh	Vetro, composti metallici, wafer ed EVA	Rimozione completa di EVA e rivestimento metallico sul wafer. - Possibilità di recuperare cellule intatte Rimozione completa di EVA	- Provoca difetti cellulari dovuti all'acido inorganico. - Genera emissioni nocive e rifiuti
		Solvente e ultrasuoni irradiazione» (Kim e Lee, 2012)	C ₆ H ₄ Cl ₂ Elettricità	46,2 kg 7,14 kWh	Vetro, composti metallici, wafer ed EVA	Rimozione completa dell'EVA, recupero del vetro e minor danno cellulare rispetto all'HNO ₃ dissoluzione Rimozione completa dell'EVA, possibile recupero della cella intatta e riutilizzo diretto del wafer, processo semplice ed economico.	- Processo costoso e produce emissioni nocive e rifiuti.
		Dissoluzione con solvente» (Doi et al., 2001)	C ₂ HCl ₃	46,2 kg	Vetro, composti metallici, wafer ed EVA		- Produce emissioni nocive e rifiuti
		Trattamenti termali* (Wang et al., 2012)	Elettricità	0,45 kWh	Vetro, chip cellulari e nastri metallici		Richiede input energetici elevati e produce dannosi emissioni.
		Riscaldamento elettrotermico» (Doni e Dughiero, 2012)	Elettricità	4,17 kWh	Vetro, composti metallici, wafer ed EVA	Garantisce una facile rimozione del vetro e non genera emissioni da combustione di EVA.	Processo lento.
Materiale separazione	Incisione chimica* (Klugmann-Radziemska et al., 2010)	Pirolisi » (Frisson et al., 2000)	Elettricità	25 kWh	Vetro, composti metallici, wafer ed EVA	L'EVA brucia praticamente senza residui.	Il processo lento e lo stress termico portano alla rottura del vetro.
		HNO ₃	5208 ml	Bicchieri,	Recupero di materiali di elevata purezza ed è anche un processo semplice ed efficiente.	Utilizza prodotti chimici quindi produce rifiuti liquidi.	
		HF	3125 ml	Composti metallici,			
		CH ₃ COOH	3125 ml	Si-cellule			
		Br gas	62,5 ml				

Figura 5.8: Inventario del ciclo di vita con i materiali in entrata e le uscite per 1 m² di pannello. (*= scala commerciale), Scienza dell'ambiente totale- Impatti ambientali del riciclo dei pannelli solari in silicio cristallino (c-Si) e tellururo di cadmio (CDTE)

Tecnologia chiave	metodi	Risultati - vantaggi	Svantaggi
Riparazione di componenti	Due tipi di metodi per smontare e analizzare i guasti nella scatola di giunzione	Può aumentare la potenza di uscita dei vecchi pannelli solari	Può essere utilizzato solo se la scatola di giunzione esterna e lo strato esterno stanno invecchiando
Separazione dei moduli	Metodo con solvente organico	La pressione meccanica è fondamentale per sopprimere il rigonfiamento dell'EVA. Il pannello in silicone è stato recuperato con successo senza danni. Il processo di trattamento termico è stata la soluzione ottimale	Rifiuti organici liquidi prodotti
	Tre metodi a confronto: smontaggio artificiale, uso di solventi organici per dissolvere i componenti e trattamento termico	Ottenuto una miscela di diversi tipi di materiali	Non ha comportato il recupero delle risorse del silicio
	Smontaggio artificiale, frantumazione, rottura criogenica e separazione elettrostatica	Riduce significativamente il tempo di dissoluzione dell'EVA nei solventi organici	Non sufficiente per la separazione dei singoli componenti; ancora in fase di ricerca di laboratorio
	Metodo ad ultrasuoni assistito da solventi organici	Separazione dei moduli	Rifiuti organici liquidi prodotti
	Metodi di trattamento termico e incisione chimica		Wafer di silicio non purificato
Riciclo del silicio	Sistema di isolamento termico a base cementizia e metodo chimico	Riciclo del silicio	Rifiuti organici liquidi prodotti
Riciclaggio di metalli rari	Rettificazione e idrometallurgia	Riciclo di indio e gallio	Prezzo alto dei prodotti chimici
	Metodi fisici e chimici: sabbiatura, lavorazione meccanica e dissoluzione del semiconduttore, precipitazione, placcatura e scambio ionico	Riciclaggio del tellururo di cadmio; costo netto stimato a \$0,04-\$0,06/W	Prezzo alto dei prodotti chimici
	Riciclaggio (CdTe e CIS) mediante trattamento meccanico a umido come macinazione e flottazione o metodi di lavorazione meccanica a secco come la sabbiatura sottovuoto	Riciclo (CdTe e CIS)	Il processo è complicato
	Trattati più tipi di pannelli solari insieme. Sono stati utilizzati due metodi fisici: i pannelli sono stati rotti e poi trattati termicamente o rotti con un martello	Mix di pannelli solari in polisilicio riciclato, silicio amorfo e CdTe; vetro direttamente riciclato	Tutti i tipi di miscele, difficili da separare

Figura 5.9: Confronto tra le tecnologie di riciclo dei pannelli solari, Global status of recycling waste solar panels: A review.

Tecnologia	Processi	Vantaggi	Svantaggi
Delaminazione	Disintegrazione fisica	➤ Gestione efficiente dei rifiuti	➤ Altri materiali si mescolano con EVA. ➤ Danni alle celle solari. ➤ Decomposizione dell'apparato.
	Diluente dissoluzione (chimica organica)	➤ Rimozione di strati organici dal vetro ➤ Riutilizzo dei rifiuti chimici ➤ Rimozione semplice di EVA	➤ Il tempo necessario per la delaminazione dipende dall'area. ➤ Attrezzature costose. ➤ Pericoloso per la salute umana.
	Dissoluzione dell'acido nitrico	➤ Rimozione completa di EVA e strato metallico dal wafer ➤ Possibile recupero dell'intera cellula	➤ Emissioni pericolose. ➤ Difetti cellulari dovuti ad acido inorganico.
	Trattamenti termali	➤ EVA completamente eliminata. ➤ Riutilizzando i wafer, è possibile recuperare l'intera cellula	➤ Comporta un elevato consumo di energia. ➤ Emissioni pericolose
	Irradiazione ultrasonica	➤ Utilizzato come processo supplementare per accelerare il processo di dissoluzione ➤ Rimozione semplificata di EVA.	➤ Processo molto costoso. ➤ Trattamento della soluzione dei rifiuti.
Materiale Separazione	Processo meccanico a secco e ad umido	➤ Processo non chimico. ➤ Processo semplice. ➤ Richiede poca energia. ➤ Attrezzature disponibili.	➤ Nessuna rimozione dei solidi disciolti
	Acquaforte	➤ Processo semplice ed efficace. ➤ Recupero di materiali ad elevata purezza	➤ Elevata richiesta di energia a causa delle alte temperature. ➤ Uso di prodotti chimici.

Figura 5.10: Processi di riciclo dei moduli solari in silicio, Recensioni sulla strategia energetica - An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling.

In generale emerge che le tecniche a base chimica producono impatti maggiori rispetto alle tecniche a base termica e che risulta necessario ponderare con attenzione la scelta del metodo di riciclo dei pannelli, poiché le varie tecniche sono strettamente correlate a determinati effetti ambientali e sulla salute umana.

Per fronteggiare il problema del rilascio di solventi durante il processo di riciclo dei pannelli solari, si può utilizzare un dispositivo di condensazione per il recupero dell'adsorbimento di fibre di carbone attivo insieme ad un dispositivo di raffinazione e disidratazione del solvente; il gas organico generato può essere trasformato in un solvente organico liquido di elevata purezza dopo il riciclo. Il processo soddisfa i requisiti per il riciclo, riduce lo scarico di inquinanti nell'atmosfera e protegge l'ambiente. (Md. Shahariar C. et al., 2019)

Capitolo 6 – Risultati Analisi dei Brevetti

La ricerca tramite le parole chiave applicate anche al portale delle pubblicazioni sfruttato nell'analisi di letteratura ha prodotto un risultato di 332 brevetti, dal 1968 ad oggi, 189 dei quali nell'ultimo decennio, a conferma ulteriore della portata del problema emergente e della necessità di investire studio e fondi. Sulla base del titolo, si è presa visione di alcune tra le proposte di metodi per il riciclo delle varie componenti dei pannelli fotovoltaici, focalizzandosi su un paio di materiali quali il piombo e l'argento.

6.1 Metalli pesanti inquinanti e metalli preziosi

Come già detto, tipicamente oltre il 90% della massa dei moduli fotovoltaici è composta da vetro, polimeri e alluminio, che possono essere classificati come rifiuti non pericolosi. Tuttavia, ci sono componenti in proporzione minore ai quali è necessario riservare particolare attenzione; dal test di lisciviazione è emerso come alcuni metalli quali piombo, cromo, nichel, stagno e cadmio superino i limiti legali delle leggi europee e italiane per l'acqua potabile, lo scarico del suolo e lo smaltimento degli inerti in discarica. Anche da una valutazione ecotossicologica risulta evidente che i gravi effetti tossici a danno dell'ecosistema sono riconducibili proprio a suddetti materiali. Si analizzeranno il caso del Piombo e dell'Argento.

6.1.1 Piombo

Il piombo costituisce uno dei tre metalli pesanti più inquinanti ed è presente nei moduli c-Si con un valore variabile tra i 1,64 g e i 11,4 g. Il costo relativo all'inquinamento causato dalla lisciviazione di materiale contenente questo elemento impropriamente smaltito può essere stimato in 1174 €/k; più difficile risulta fornire una stima relativa ai danni apportati alla salute umana, all'atmosfera e alle falde acquifere. Per la ricerca di metodi per il riciclo di materiali a base di piombo sono state utilizzate nella piattaforma *esp@cenet* le seguenti parole: 'lead', 'extract', 'photovoltaic'. Ottenendo 22 brevetti in output, si è scelto di considerare il numero US10774433, che tratta del riciclo elettrochimico di materiali a base di piombo, utilizzati nei processi di generazione dell'energia. Il metodo prevede di far disciogliere il materiale in un solvente eutettico (comprendente un donatore di legame idrogeno e un sale di ammonio quaternario mantenuto costante sopra i 20°) per formare un elettrolita, fornendo un elettrodo di piombo funzionante in contatto elettrico con l'elettrolita e generando un potenziale attraverso l'elettrolita: in questo modo si riduce la quantità di piombo presente nel materiale. Il piombo metallico depositato e ridotto e l'elettrodo di piombo funzionante sono idonei al riciclo o al riutilizzo senza la necessità di altri processi.

Come riscontrato anche nella letteratura, è proprio il piombo proveniente dal riciclo il più disponibile e meno dannoso all'ambiente e alla salute dei minatori. La tecnologia emergente della perovskite, ormai diffusasi da alcuni anni nel campo del fotovoltaico, utilizza il piombo riciclato delle vecchie batterie per auto nella produzione di pannelli fotovoltaici in grado di produrre energia per decenni, evitando l'accumulo in discarica e nell'ambiente di un materiale altamente inquinante. Questa tecnologia innovativa prevede che in un pannello solare finito lo strato contenente piombo sia completamente incapsulato da altri materiali,

limitando il rischio di contaminazione dell'ambiente. Quando i pannelli avranno finito il loro ciclo di vita, il piombo sarà riciclato in nuovi pannelli solari. (Greenreport, 2014, B)



Figura 6.1: Piombo.

6.1.2 Argento

L'argento costituisce una frazione molto piccola della massa di un pannello solare (600 g/t), ma una percentuale molto alta del suo valore (circa il 47%). Affidandosi sempre alla banca dati *esp@cenet* attraverso le seguenti parole chiave: 'lead', 'extract', 'photovoltaic', si è preso visione di alcune tecniche testate per recuperare questo metallo prezioso dai pannelli FV e, sulla base del brevetto numero EP3178576B1, si individuano le seguenti fasi:

- a) macinazione della cella fotovoltaica, in modo da formare un materiale macinato contenente particelle di argento;
- b) dissoluzione dell'argento contenuto nel materiale macinato in una soluzione contenente almeno un liquido ionico, o un mediatore redox, o acqua. La dissoluzione porta alla formazione di ioni argento in soluzione;
- c) separazione del materiale macinato dalla soluzione;
- d) elettrolisi della soluzione per ridurre gli ioni argento e per rigenerare il mediatore redox.

In alternativa, un metodo per concentrare l'argento dai moduli di scarto proposto dalla letteratura presenta le fasi di:

- a) rimozione manuale del telaio in alluminio;
- b) fresatura dei moduli;
- c) setacciatura e la selezione della frazione con granulometria inferiore a 0,5 mm;
- d) lisciviazione della polvere ottenuta in acido nitrico (HNO_3) al 64% per 2 ore a temperatura ambiente;
- e) precipitazione della soluzione lisciviata mediante cloruro di sodio al 99%.

Nella prima fase di caratterizzazione è stata identificata la disposizione dell'argento per mezzo della microscopia ottica con ingrandimenti di 100 volte e 200 volte: esso si deposita sul semiconduttore come un unico filo dritto e questi fili sono distribuiti in tutto il modulo fotovoltaico. La seconda fase ha previsto l'utilizzo di mezzi meccanici (fresatura, setacciatura) e idrometallurgici (lisciviazione in HNO_3). Dallo studio svolto è emersa la possibilità di precipitare la maggior parte dell'argento presente nel modulo fresato e lo svantaggio di sfruttare all'interno del metodo un processo di pirolisi, poiché meno conveniente, in quanto più dispendioso di energia e meno prestante in termini di resa in argento. (Pablo Dias et al., 2016)

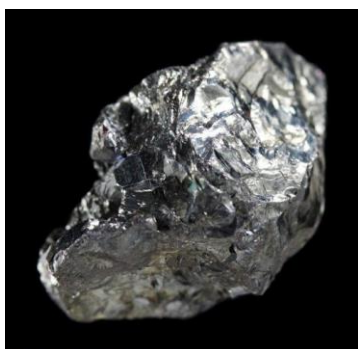


Figura 6.2: Argento.

CONCLUSIONI

Mentre l'attuale ricerca sulla tecnologia delle celle solari è fortemente focalizzata sul miglioramento dell'efficienza di conversione dei moduli fotovoltaici in silicio cristallino, le indagini sul miglioramento e il perfezionamento delle strategie di riciclo per i pannelli solari fotovoltaici EoL dovrebbero essere condotte con maggiore intensità. Prevedendo anche attraverso un'analisi statistica l'inevitabile aumento dei rifiuti solari nei prossimi decenni, è necessaria una continua ricerca ed ottimizzazione dei processi di riciclo per gli attuali riciclatori, nonché lo sviluppo di nuove tecnologie per l'implementazione futura. Da una parte i produttori di pannelli solari dovrebbero investire nella progettazione di pannelli che risultino sempre più duraturi, dall'altra sono necessari un ulteriore interesse e dinamismo nella definizione delle politiche per lo sviluppo sostenibile e la gestione della filiera del prodotto, che agevoli ed incentivi l'attenzione all'ultima fase del ciclo di vita di questi strumenti. Come studiato nella normativa, l'Europa, come anche il Giappone, ad esempio, hanno incluso il riciclo dei pannelli solari EoL nelle loro politiche, obbligando i produttori o gli installatori FV a finanziare il riciclo dei pannelli solari EoL; i primi segni di una strada ancora molto lunga e troppo trascurata da alcune realtà territoriali, che tendono a slacciarsi dal problema, trasportandolo in suoli di altre pertinenze.

L'analisi svolta e presentata in questo elaborato mirava ad individuare le tecnologie di riciclo dei pannelli fotovoltaici in silicio cristallino più convenienti a livello ambientale e della salute umana, in una combinazione di risultati emersi dall'LCA e applicazioni di altri processi, parallelamente ad una considerazione di fattibilità economica. Sulla base della composizione dei pannelli in questione, studiati e progettati per offrire un determinato servizio e resistere alle intemperie e all'usura, è stata verificata l'effettiva complessità di smaltimento degli stessi. Dall'analisi delle tecnologie impiegate nel tentativo di recuperare le componenti fotovoltaiche, è emerso che i processi fisici tanto quanto quelli chimici, termici e fisico-chimici offrono sia vantaggi che svantaggi, come anche il processo Deutsche Solar, il processo First Solar e il processo RESOLVED. Dagli studi di Letteratura, in generale, emerge che le tecniche a base chimica producono impatti maggiori rispetto a quelle a base termica; in ogni caso la scelta di processo e di impianto è strettamente correlate a determinati effetti ambientali e sulla salute umana, legata dunque anche alla realtà alla quale è destinata. Certo è che il riciclo risulta conveniente in un'ottica sia di salvaguardia dell'ambiente, che di impiego delle risorse, relazionando soprattutto al costo delle materie vergini e delle energie richieste per reperirle e renderle disponibili. Anche la Letteratura lo conferma e confronta il riciclo con il gravoso impatto dei pannelli dismessi lasciati in discarica, causa concorrente al riscaldamento globale, alla formazione di particolato fine, alla formazione di ozono, all'acidificazione terrestre, all'eutrofizzazione in acqua dolce e marina, alla scarsità di risorse minerali e fossili e al consumo di acqua.

Il danno ambientale provocato dall'intervento dell'uomo sul pianeta è sempre più concreto ed allarmante e ci sta rendendo maggiormente sensibili alle tematiche ambientali, richiedendo con urgenza attenzioni, soluzioni ed interventi migliorativi. Nell'ambito del fotovoltaico questo sta portando allo sviluppo di numerose tecnologie specializzate nel disassemblaggio e nello smaltimento dei pannelli in modo progressivamente meno impattante e più sostenibile. Questo permetterà di continuare a sfruttare l'energia pulita proveniente dal sole senza inquinare ed intaccare l'ecosistema che risente della dismissione dei pannelli, in un'ottimizzazione dell'utilizzo delle risorse primarie e promuovendo il recupero dei materiali.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Christopher Luederitz, Moritz Meyer, David J. Abson, Fabienne Gralla, Daniel J. Lang, Anna-Lena Rau, Henrik von Wehrden, 2016, Systematic student-driven literature reviews in sustainability science e an effective way to merge research and teaching, Elsevier - Journal of Cleaner Production

Daniel Nugent and Benjamin K. Sovacool, 2014, Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey, Energy Policy, vol. 65, issue C, 229-244

Experimental, economic and life cycle assessments of recycling end-of-life monocrystalline silicon photovoltaic modules, Elsevier - Journal of Cleaner Production

G. Ansanelli, G. Fiorentino, M. Tammaro, A. Zucaro, 2021, A Life Cycle Assessment of a recovery process from End-of-Life Photovoltaic Panels, Elsevier - Applied energy

Md. Shahariar Chowdhury, Kazi Sajedur Rahman, Tanjia Chowdhury, 2019, An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling, Elsevier - Energy strategy reviews

Michael Z. Hauschild, Ralph K. Rosenbaum, Stig Irving Olsen, 2018, Life Cycle Assessment – Theory and Practice

Mitchell Shyan Wei Lim, Dong He, Jasmine Sie Ming Tiong, Svenja Hanson, Thomas

Chung-Kuang Yang , Timm Joyce Tiong , Guan-Ting Pan , Siewhui Chong, 2022,

Pablo Dias, Selene Javimczik, Mariana Benevit, Hugo Veit, Andréa Moura Bernardes, 2016, Recycling WEEE: Extraction and concentration of silver from waste crystalline silicon photovoltaic modules, Elsevier - Waste Management

Paiano Annarita, 2015, Photovoltaic waste assessment in Italy, Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews

Parikhit Sinha, 2015, Potential environmental hazards of photovoltaic panel disposal:

Discussion of Tammaro et al., Elsevier - Journal of Hazardous Materials

Saverio Petrangelo, 2011, Fotovoltaico sostenibile: la gestione e il riciclo dei moduli a fine vita, Università degli Studi di Bologna

Sunanda Mishra¹, Prasant Kumar Rout², Alok Prasad Das¹, 2019, Solar photovoltaic panels as next generation waste: a review, Biointerface research in Applied Chemistry

Thomas Maani, Ilke Celik, Michael J.Heben, Randall J.Ellingsonc, Defne Apula, 2020,

Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-SI) and cadmium telluride (CDTE) solar panels, Elsevier - Total Environmental Science

Yan Xu, Jinhui Li, Quanyin Tan, Anesia Lauren Peters, Congren Yang, 2018, Global status of recycling waste solar panels: A review, Elsevier - Waste Management

SITOGRAFIA

Angela Mastrandrea, Pannelli fotovoltaici: il problema dello smaltimento,

<https://www.betaformazione.com/il-fotovoltaico-e-il-problema-dello-smaltimento-dei-pannelli-fotovoltaici/>

Camilla Antonioni, 2022, Le componenti dei pannelli fotovoltaici,

<https://www.otovo.it/blog/componenti-materiali-pannelli-fotovoltaici/>

Carrabba Paola, Padovani Laura Maria, 2020, ENEA, I pannelli fotovoltaici a fine vita -

Considerazioni sull'impatto ambientale e sulla salute dei processi di smaltimento\riciclo\riuso,

<https://iris.enea.it/handle/20.500.12079/54421?mode=full.168>

Economia circolare, Gerarchia dei rifiuti, 2022,

<https://economiecircolare.com/glossario/gerarchia-dei-rifiuti/>

FIRE, Federazione Italiana per l'uso Razionale dell'Energia, 2022, Guida al fine vita degli

impianti fotovoltaici, <http://fire-italia.org/associarsi/guida-al-fine-vita-degli-impianti-fotovoltaici/>

Fotovoltaico Norditalia, [https://www.fotovoltaiconorditalia.it/mondo-fotovoltaico/i-pannelli-fotovoltaici-si-possano-](https://www.fotovoltaiconorditalia.it/mondo-fotovoltaico/i-pannelli-fotovoltaici-si-possano-riciclare#:~:text=Il%20riciclaggio%20di%20una%20tonnellata%20di%20pannelli%20fotovoltaici,module%20viene%20fabbricato%20al%20100%25%20con%20materie%20primarie.)

[riciclare#:~:text=Il%20riciclaggio%20di%20una%20tonnellata%20di%20pannelli%20fotovoltaici,module%20viene%20fabbricato%20al%20100%25%20con%20materie%20primarie.](https://www.fotovoltaiconorditalia.it/mondo-fotovoltaico/i-pannelli-fotovoltaici-si-possano-riciclare#:~:text=Il%20riciclaggio%20di%20una%20tonnellata%20di%20pannelli%20fotovoltaici,module%20viene%20fabbricato%20al%20100%25%20con%20materie%20primarie.)

Gestore Servizi Energetici, 2012, Disciplinary Tecnico del GSE per i moduli del IV e V

Conto energia,

https://gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Archivio/Disciplinare%20Requisiti%20per%20i%20Consorzi%20FTV.pdf

Gestore Servizi Energetici, 2012, Disciplinary Tecnico del GSE per i moduli del IV e V

Conto energia, B, <https://www.apertacontrada.it/2012/12/21/gse-disciplinare-tecnico-per-la-definizione-e-verifica-dei-requisiti-tecnici-dei-sistemiconsorzi-per-il-recupero-e-riciclo-dei-moduli-fotovoltaici-a-fine-vita-21-dicembre-2012/>

Greenreport, 2017, A, <https://greenreport.it/news/economia-ecologica/litalia-punta-al-riciclo-dei-pannelli-fotovoltaici-un-business-15-miliardi-dollari/>

Greenreport, 2014, B, <https://greenreport.it/news/economia-ecologica/riciclare-batterie-piombo-usate-per-produrre-celle-solari-nel-progetto-eni-video/>

IEA PVPS - Snapshot of Global Photovoltaic Markets, 2020, https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA_PVPS_Snapshot_2020.pdf

ISO 14042, 2000, Environmental management — Life cycle assessment — Life cycle impact assessment, <https://www.iso.org/standard/23153.html>

ISO 14043, 2000, Environmental management — Life cycle assessment — Life cycle interpretation, <https://www.iso.org/standard/23154.html>

Luigi Schirru, <https://www.mrkilowatt.it/impianti-fotovoltaici/2017-5-19-smaltimento-pannelli-fotovoltaici-problema-o-business/>

Massimo Medugno, Sulla definizione di recupero, <https://www.tuttoambiente.it/commenti-premium/sulla-definizione-di-recupero/>

Parlamento Italiano, 2014, A, Decreto legislativo 14.03.2014 n.49, <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2014/03/28/14G00064/sg>

Parlamento Italiano, 2014, B, Decreto Legislativo 25 luglio 2005, n. 151, <https://web.camera.it/parlam/leggi/deleghe/testi/05151dl.htm>

Parlamento Italiano, 2014, C, D.Lgs. 152/2006 o Testo Unico Ambientale, 2022, <https://www.gazzettaufficiale.it/dettaglio/codici/materiaAmbientale>

Resielp, 2022, Recovery of Silicon and other materials from End-of-Life Photovoltaic Panels, <https://www.resielp.eu>

Valentina Dossi, L'evoluzione dei pannelli solari a film sottile, <https://www.green.it/pannelli-solari-film-sottile/>

Wikipedia, 2022, A, https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_fotovoltaico

Wikipedia, 2022, B, https://it.wikipedia.org/wiki/Pannello_fotovoltaico