

**P. CARRABBA, L.M. PADOVANI**

Unità Studi, Analisi e Valutazioni  
Servizio monitoraggio e valutazione delle tecnologie  
Centro Ricerche Casaccia

## **I PANNELLI FOTOVOLTAICI A FINE VITA**

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

RT/2020/7/ENEA



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

P. CARRABBA, L.M. PADOVANI

Unità Studi, Analisi e Valutazioni  
Servizio monitoraggio e valutazione delle tecnologie  
Centro Ricerche Casaccia

# I PANNELLI FOTOVOLTAICI A FINE VITA

## Considerazioni sull'impatto ambientale e sulla salute dei processi di smaltimento/riciclo/riuso

RT/2020/7/ENEA



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

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina [www.enea.it](http://www.enea.it)

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

## **I PANNELLI FOTOVOLTAICI A FINE VITA**

Considerazioni sull'Impatto Ambientale e sulla Salute dei processi di smaltimento/riciclo/riuso

P. Carrabba, L.M. Padovani

### **Riassunto**

Nel presente rapporto si cerca di esplorare le possibili problematiche ambientali collegate al "fine vita" dei pannelli fotovoltaici, comunemente ritenuti apparati a basso impatto ambientale. I pannelli o parti di essi, smaltiti tal quali in discarica o avviati a processi di incenerimento, possono rilasciare nel terreno, nelle falde acquifere o in atmosfera sostanze altamente inquinanti, il che sottolinea l'importanza della messa a punto di adeguati processi di smaltimento/riciclaggio a fine vita. Inoltre, alcuni materiali contenuti nei pannelli fotovoltaici sono elementi rari e con alti costi di estrazione. Un riciclaggio a "elevato valore" che consenta di valorizzare al massimo i rifiuti derivanti dai moduli a fine vita recuperando i componenti di maggiore pregio in essi presenti, oltre ad evitare potenziali danni all'ambiente, offre potenziali benefici di tipo economico e strategico. La fase relativa al riciclaggio per recupero e riutilizzo dei componenti costitutivi è tuttavia molto delicata da un punto di vista ambientale, in quanto un trattamento non adeguato può portare al rilascio nell'ambiente di sostanze altamente inquinanti e pericolose (Tammaro et al., 2015). Il lavoro, inoltre, prova a fare una stima al 2050 del possibile danno ambientale derivante da alcuni degli elementi costitutivi dei pannelli fotovoltaici, nei casi in cui questi venissero a) abbandonati tal quale nell'ambiente, b) smaltiti direttamente in discarica, c) avviati a procedure di recupero/riciclaggio.

**Parole chiave:** pannelli fotovoltaici, fine vita, riciclo, riuso, ambiente, salute

### **Abstract**

*This technical report tries to define the environmental problems related to the "end of life" phase of photovoltaic panels, commonly considered as low environmental impact devices. The panels, or parts of them, directly disposed in landfills or sent to incineration processes, can release highly polluting substances into the ground, aquifers or in the atmosphere, which underlines the importance of developing adequate disposal or treatment processes for the "end of life" phase. Furthermore, some elements contained into the photovoltaic panels are rare and/or with high extraction costs. An "high value" recycling offers potential economic and strategic benefits, allowing maximize the waste value deriving from the modules at the end of their life. The recycling process permits the recovery of the most valuable components of the modules, as well as to avoid potential damages to the environment. The phase relating to recycling for recovery and reuse of the constituent components is however very delicate from an environmental point of view, as inadequate treatment can lead to the release of highly polluting and dangerous substances into the environment (Tammaro et al., 2015). The work also tries to make an estimate by 2050 of the possible environmental damage deriving from some of the constituent elements of the photovoltaic panels, in the case they were a) directly abandoned in the environment, b) disposed in a landfills, c) initiated to a recovery / recycling procedures.*

**Keywords:** photovoltaic panels, end of life, recycling, reuse, environment, health



## INDICE

Introduzione	7
Definizioni di legge degli impatti ambientali e sulla salute dei processi di dismissione degli impianti fotovoltaici	9
<i>Presunzione di pericolosità dei rifiuti</i>	12
Rifiuti da pannelli fotovoltaici	14
Come è fatto un pannello fotovoltaico	16
<i>Tecnologia al silicio cristallino</i>	18
<i>Tecnologia a film sottile</i>	20
Impatto ambientale dei pannelli fotovoltaici	22
Processi di riciclaggio dei pannelli fotovoltaici	39
<i>Il Progetto EU SENSE</i>	41
<i>Il Progetto EU RESOLVED</i>	42
<i>Il processo First Solar</i>	44
<i>Il processo Deutsche Solar</i>	47
<i>Il processo Sunicon</i>	49
Problematiche energetiche e di emissione collegate ai processi di riciclaggio dei pannelli fotovoltaici	52
Un po' di conti sul fotovoltaico in Italia	53
Valutazione delle emissioni di GHG degli impianti fotovoltaici e LCA	55
Tentativo di quantificazione del potenziale danno ecologico del mancato riciclo dei pannelli fotovoltaici	58
<i>Dati e analisi</i>	58
<i>Scenari</i>	65
<i>Risultati</i>	73
Conclusioni	76
BIBLIOGRAFIA	78
SITOGRAFIA	80



## Introduzione

Partendo dal principio che non esistono attività umane a impatto zero, cerchiamo qui di definire le problematiche ambientali collegate al “fine vita” dei pannelli fotovoltaici, che sono comunemente ritenuti apparati a basso impatto ambientale.

La vita di un pannello fotovoltaico può essere suddivisa in tre fasi: costruzione, produzione di energia elettrica e smaltimento a fine vita. Le criticità ambientali del solare fotovoltaico emergono soprattutto durante le fasi di costruzione e smaltimento per l'estrazione e l'impiego di materiali o sostanze nocive che, se liberate nell'ambiente, possono provocare danni all'ecosistema e alla salute umana.

I pannelli e parti di essi, smaltiti tal quali in discarica o avviati a processi di incenerimento, possono rilasciare nel terreno, nelle falde acquifere o in atmosfera sostanze altamente inquinanti, il che sottolinea l'importanza della messa a punto di adeguati processi di smaltimento a fine vita.

Inoltre, i materiali contenuti nei pannelli fotovoltaici hanno un loro valore intrinseco, in quanto spesso si tratta di elementi rari e con alti costi di estrazione. Un riciclaggio a “elevato valore”, che consenta di valorizzare al massimo i rifiuti derivanti dai moduli a fine vita recuperando i componenti di maggiore pregio in essi presenti, oltre ad evitare potenziali danni all'ambiente, offre potenziali benefici di tipo economico o almeno strategico.

Il fine vita dei pannelli fotovoltaici può essere descritto in tre fasi: a) recupero dei pannelli dai siti di installazione, b) trasporto presso i centri di raccolta, c) riciclaggio per recupero e riutilizzo di componenti costitutivi.

Ai fini del presente lavoro prenderemo in considerazione la sola fase relativa al riciclaggio per recupero e riutilizzo di componenti costitutivi, fase molto delicata da un punto di vista ambientale, in quanto un trattamento non adeguato può portare al rilascio nell'ambiente di sostanze altamente inquinanti e pericolose (Tammaro *et al.*, 2015).

Lo sviluppo e l'adozione di tecniche di riciclaggio di elevato valore nell'ambito della gestione del fine vita consentirebbe inoltre di chiudere in maniera virtuosa il ciclo di vita di questi dispositivi, approdando così da un approccio di tipo “dalla culla alla tomba” (*from cradle to grave*) ad uno di tipo “dalla culla alla culla” (*from cradle to cradle*), grazie al quale i materiali e i componenti recuperati dai moduli a fine vita vengono introdotti in un nuovo ciclo di produzione dello stesso bene, ottenendo un notevole risparmio energetico e economico nonché una diminuzione sostanziale degli impatti ambientali.



Diverse questioni relative alla fine del ciclo di vita dei pannelli fotovoltaici devono essere prese in considerazione per valutare in modo completo l'impatto ambientale della tecnologia fotovoltaica, incluso il consumo di energia e reagenti e le emissioni di inquinanti che possono essere generate dai processi di riciclaggio e di recupero (Tammaro *et al.*, 2015, 2016).

Le notevoli quantità di rifiuti ampiamente riciclabili che dovranno essere trattate nei prossimi anni impongono la necessità di affrontare le varie problematiche (tecnologiche, economiche, ambientali ecc.) pianificando le attività di smaltimento degli impianti fotovoltaici alla fine del loro ciclo di vita con operazioni di demolizione, smantellamento e rimozione, smaltimento e/o riciclaggio dei diversi componenti in un contesto di responsabilità ambientale (Malandrino *et al.*, 2017).

In sintesi, la messa a punto di appropriate attività di smaltimento degli impianti fotovoltaici avrà un ruolo strategico per alleggerire i condizionamenti sulla catena di approvvigionamento dell'industria fotovoltaica e per il corretto uso di materiali e sostanze ad alto rischio e di combustibili liquidi, solidi e gassosi pericolosi per la salute umana e l'ambiente, rendendo efficiente e efficace il trattamento a valle dei rifiuti fotovoltaici in un'ottica di economia circolare (Malandrino *et al.*, 2017).

## **Definizioni di legge degli impatti ambientali e sulla salute dei processi di dismissione degli impianti fotovoltaici**

Il D.Lgs. 152/2006<sup>1</sup> e s.m.i. (da qui in poi citato come Testo Unico Ambientale – T.U.A.) definisce l’impatto ambientale (art. 5 - punto c) come:

*“effetti significativi, diretti e indiretti, di un piano, di un programma o di un progetto, sui seguenti fattori:*

- *popolazione e salute umana;*
- *biodiversità, con particolare attenzione alle specie e agli habitat protetti in virtù della direttiva 92/43/CEE<sup>2</sup> (Conservazione degli habitat naturali e seminaturali e della flora e della fauna selvatiche) e della direttiva 2009/147/CE<sup>3</sup> (Conservazione degli uccelli selvatici);*
- *territorio, suolo, acqua, aria e clima;*
- *beni materiali, patrimonio culturale, paesaggio;*
- *interazione tra i fattori sopra elencati;”*

e l’inquinamento come (i-ter):

*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.*

Quando si approccia la valutazione del possibile impatto di una attività umana sull’ambiente e la salute è, quindi, opportuno analizzare la *possibile emissione di sostanze, vibrazioni, calore o rumore* e individuare i *comparti ambientali (acqua, aria, suolo, ecosistemi) eventualmente interessati.*

Il binomio *“rifiuto-inquinamento”* è il primo a venire in mente quando ci si propone di analizzare la fase di dismissione di apparecchiature a qualunque fine siano realizzate e i processi attuati per detta dismissione.

*Si definisce "rifiuto" qualsiasi sostanza od oggetto che rientra nelle categorie riportate nell'Allegato A [alla parte quarta del T.U.A.] e di cui il detentore si disfi o abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi (ex art. 183 T.U.A.).*

Sempre il T.U.A. (parte quarta – Capo 1) parla di 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

<sup>1</sup>[https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie\\_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171](https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171). Le modifiche apportate nel tempo al D.Lgs. 152/2006 sono riportate sul sito: <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2006-04-03;152!vig=> I testi pubblicati su *Normattiva.it* non godono di ufficialità e sono, quindi, da intendersi ad esclusivo scopo informativo.

<sup>2</sup> <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1992L0043:20070101:IT:PDF>

<sup>3</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0147>

della produzione di rifiuti e facilitare l'utilizzo efficiente delle risorse durante l'intero ciclo di vita del prodotto, comprese le fasi di riutilizzo, riciclaggio e recupero dei rifiuti e di Criteri di priorità nella gestione dei rifiuti (art. 179 – comma 1) che prevede la preparazione per il riutilizzo, il riciclaggio e il recupero di altro tipo (ad esempio a scopo energetico) prima di arrivare allo smaltimento. Nel rispetto della gerarchia del trattamento dei rifiuti (art. 179 – comma 6), le misure dirette al recupero dei rifiuti mediante la preparazione per il riutilizzo, il riciclaggio o ogni altra operazione di recupero di materia sono adottate con priorità rispetto all'uso dei rifiuti come fonte di energia.

Ancora, il T.U.A. (parte quarta – art. 183) definisce come “rifiuto pericoloso” quel ***rifiuto che presenta una o più caratteristiche*** di cui all'allegato I della parte quarta del decreto stesso, secondo le categorie di esplosivo, comburente, facilmente infiammabile, infiammabile, irritante, nocivo, tossico, cancerogeno, corrosivo, infettivo, mutageno, sensibilizzante, ecotossico, suscettibili dopo lo l'eliminazione di dare origine ad altra sostanza pericolosa. Esso è vincolante per quanto concerne la determinazione dei rifiuti da considerare pericolosi. L'inclusione di una sostanza o di un oggetto non significa che esso sia un rifiuto in tutti i casi, ferma restando la definizione di cui all'articolo 183.

Ancora, il T.U.A. (Parte quarta – art. 184) contiene una classificazione delle tipologie di rifiuto, essenzialmente ***in relazione alla loro origine*** (rifiuti urbani, rifiuti speciali da attività agricola, scavi, lavorazioni industriali ecc.) e individua come “rifiuti pericolosi” (art. 184 – comma 4) quelli che ***presentano almeno una delle caratteristiche di cui all'allegato D<sup>4</sup> della parte quarta*** del decreto stesso, che tiene conto ***dell'origine e della composizione dei rifiuti***.

L'allegato C alla parte quarta T.U.A., invece, fornisce una definizione delle possibili operazioni di recupero/riciclaggio. Quelle direttamente interessate agli argomenti che stiamo trattando, sono:

- **R3** Riciclaggio/recupero delle sostanze organiche non utilizzate come solventi (comprese le operazioni di compostaggio e altre trasformazioni biologiche)<sup>5</sup>
- **R4** Riciclaggio/recupero dei metalli e dei composti metallici
- **R5** Riciclaggio/recupero di altre sostanze inorganiche<sup>6</sup>
- **R6** Rigenerazione degli acidi o delle basi
- **R7** Recupero dei prodotti che servono a ridurre l'inquinamento
- **R8** Recupero dei prodotti provenienti dai catalizzatori

Alla considerazione di questi elementi va però aggiunta anche quella relativa alle Operazioni di smaltimento (T.U.A. – Parte quarta, Allegato B), fondamentali per quanto riguarda appunto lo smaltimento dei residui che sopravvivono ai processi di recupero/riutilizzo, e precisamente, quelle di maggior interesse:

<sup>4</sup> <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2006-04-03;152!vig=>

<sup>5</sup> Sono comprese la gassificazione e la pirolisi che utilizzano i componenti come sostanze chimiche

<sup>6</sup> È compresa la pulizia del suolo risultante in un recupero del suolo e il riciclaggio dei materiali da costruzione inorganici

- **D1** Deposito sul o nel suolo (ad esempio discarica).
- **D5** Messa in discarica specialmente allestita (ad esempio sistematizzazione in alveoli stagni, separati, ricoperti o isolati gli uni dagli altri e dall'ambiente).
- **D9** Trattamento fisico-chimico non specificato altrove nel presente allegato, che dia origine a composti o a miscugli eliminati secondo uno dei procedimenti elencati nei punti da D1 a D12 (ad esempio evaporazione, essiccazione, calcinazione ecc.).
- **D13** Raggruppamento preliminare prima di una delle operazioni di cui ai punti da D1 a D12.
- **D15** Deposito preliminare prima di uno delle operazioni di cui ai punti da D1 a D14 (escluso il deposito temporaneo, prima della raccolta, nel luogo in cui sono prodotti).

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.

Ai fini dell'individuazione delle sostanze pericolose, quindi, per "sostanza pericolosa" si intende qualsiasi sostanza che è o sarà classificata come pericolosa ai sensi del Regolamento (CE) 1272/2008<sup>7</sup> (relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele) che modifica legislazioni precedenti;

Per "metallo pesante" si intende qualunque composto di antimonio, arsenico, cadmio, cromo (VI), rame, piombo, mercurio, nichel, selenio, tellurio, tallio e stagno, anche quando tali metalli appaiono in forme metalliche classificate come pericolose. Se un rifiuto è identificato come pericoloso mediante riferimento specifico o generico a sostanze pericolose, esso è classificato come pericoloso solo se le sostanze raggiungono determinate concentrazioni (ad esempio percentuale in peso), tali da conferire al rifiuto in questione una o più delle proprietà summenzionate. Entra in questo specifico la definizione di rifiuti contraddistinti da "voce a specchio", ovvero quei rifiuti che possono essere considerati pericolosi o non pericolosi proprio in base ai valori di concentrazione delle sostanze pericolose eventualmente contenute in essi. Un rifiuto individuato da una "voce a specchio" è identificato come pericoloso solo se le sostanze pericolose raggiungono determinate concentrazioni tali da conferire al rifiuto una o più delle proprietà di cui all'Allegato I del T.U.A., come modificato dal D. Lgs 205/2010, altrimenti il rifiuto è inteso come "non pericoloso" (ad esempio il codice CER 06 03 15 indica i rifiuti costituiti da "Ossidi metallici contenenti metalli pesanti" mentre il codice CER 06 03 16 identifica gli "Ossidi metallici diversi da quelli di cui alla voce 06 03 15"). Sulla base del principio di precauzione, è tuttavia 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 (o fino a che non sia possibile) effettuare le dovute misurazioni/controlli.**

In particolare, secondo la parte IV - Allegato H del T.U.A., i costituenti che possono rendere pericolosi i rifiuti sono così caratterizzati:

- C6 Composti del rame

<sup>7</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008R1272&from=IT>

- C7 Composti dello zinco
- C9 Selenio, composti del selenio
- C10 Composti dell'argento
- C11 Cadmio, composti del cadmio
- C12 Composti dello stagno
- C14 Tellurio, composti del tellurio
- C18 Piombo, composti del piombo
- C21 Cianuri inorganici
- C22 I seguenti metalli alcalini o alcalino-terrosi: litio, sodio, potassio, calcio, magnesio sotto forma non combinata
- C23 Soluzioni acide o acidi sotto forma solida
- C24 Soluzioni basiche o basi sotto forma solida

E ancora, rifiuti aventi come costituenti:

- C28 Perossidi
- C39 Fenoli, composti fenolati
- C40 Solventi alogenati
- C41 Solventi organici, esclusi i solventi alogenati
- C46 Eteri

Il Titolo V dello stesso Decreto, poi, detta Criteri generali per l'analisi di rischio sanitario ambientale sito-specifica (Allegato 1); Criteri generali per la caratterizzazione dei siti contaminati (Allegato 2); Criteri generali per la selezione e l'esecuzione degli interventi di bonifica e ripristino ambientale (Allegato 3); Valori di concentrazione limite accettabili nel suolo e nel sottosuolo riferiti alla specifica destinazione d'uso dei siti da bonificare (Allegato 5).

### **Presunzione di pericolosità dei rifiuti**

Un aspetto che va considerato con attenzione, quando si utilizzano materiali provenienti da cicli industriali precedenti come materia prima per cicli industriali successivi e/o differenti, è la presunzione di pericolosità dei materiali utilizzati, che passano da uno status di rifiuto (potenzialmente pericoloso) ad uno di materia prima riutilizzabile. Intanto è bene riflettere sul fatto che la finalità della Direttiva quadro sui rifiuti stessi, legata al riutilizzo e/o riciclo dei rifiuti, si basa su una corretta classificazione dei rifiuti, il che dovrebbe mettere in condizione di utilizzare quelli potenzialmente pericolosi nel modo corretto.

È pur vero, però, che il produttore dei rifiuti, il quale è tenuto alla determinazione analitica delle sostanze pericolose contenute, agisce correttamente se limita la ricerca delle sostanze pericolose - per assegnare le *caratteristiche di pericolo* ai rifiuti che possono essere contraddistinti con voci a specchio - a quelle che sono con elevata probabilità presenti nei rifiuti prodotti<sup>8</sup>. Ciò permette al detentore del rifiuto di ricercare le sostanze pericolose eventualmente presenti secondo un criterio di ragionevolezza. Le analisi da compiere sul

---

<sup>8</sup> <http://curia.europa.eu/juris/liste.jsf?language=it&jur=C&num=C-487%2F17&td=ALL>

rifiuto, quindi, non tenderanno a verificare l'assenza di qualunque tipo di sostanza classificata come pericolosa, bensì a concentrarsi su quelle per le quali ***ragionevolmente è pensabile possano essere contenute*** nel rifiuto stesso, secondo una giusta fattibilità tecnica e economica dell'analisi.

La Corte di Giustizia Europea conferma, inoltre, la possibilità di giungere ad attribuire le caratteristiche di pericolo al rifiuto anche con mezzi diversi dalle analisi di laboratorio, ad esempio cercando informazioni sul processo chimico, sul processo di fabbricazione e sulle sostanze impiegate. Non va tuttavia trascurato il cosiddetto *Principio di precauzione*, che però va considerato come *ultima ratio* e non come punto di partenza del processo di verifica della pericolosità del rifiuto: *“qualora, dopo una valutazione dei rischi quanto più possibile completa, tenuto conto delle circostanze specifiche del caso di specie, il detentore di un rifiuto che può essere classificato sia con codici corrispondenti a rifiuti pericolosi sia con codici corrispondenti a rifiuti non pericolosi si trovi nell'impossibilità pratica di determinare la presenza di sostanze pericolose o di valutare le caratteristiche di pericolo che detto rifiuto presenta, quest'ultimo deve essere classificato come rifiuto pericoloso”*<sup>9</sup>.

Oggi due terzi dei pannelli immessi sul mercato sono fatti di silicio cristallino. Essi sono assemblati per circa il 90% con materiali classificati come non pericolosi, cioè vetro, polimeri e alluminio.

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 riciclaggio non solo riduce i rifiuti e le relative emissioni dannose nell'ambiente, ma riduce anche il consumo di energia e le emissioni relative alla produzione dei nuovi pannelli. Questo è vero particolarmente in relazione alle materie prime ad alto contenuto di impurità (ad es. i precursori di materiali semiconduttori), che spesso richiedono un pretrattamento ad alta intensità energetica per raggiungere i livelli di purezza richiesti. Una corretta raccolta differenziata è anche importante per la gestione a lungo termine dei metalli rari utilizzati nel fotovoltaico.

---

<sup>9</sup> Corte di Giustizia UE il 28 marzo 2019 (cause C487 e C489/17)

## Rifiuti da pannelli fotovoltaici

Il rapido incremento di pannelli fotovoltaici, che necessiteranno a breve di essere avviati a recupero, ha posto l'attenzione sulla necessità di attribuire una classificazione a questa tipologia di apparecchiature, che è stata in parte ignorata dalla normativa fino a quando, a seguito dell'emanazione della Direttiva comunitaria 2002/95/CE<sup>10</sup> (comunemente detta RoHS dall'inglese: *Restriction of Hazardous Substances Directive*) e dei suoi aggiornamenti fino alla Direttiva 2011/65/CE<sup>11</sup> (RoHS 2), in Italia entra in vigore il D. Lgs. n.151/2005<sup>12</sup> e successivamente il D. Lgs. 49/2014<sup>13</sup> che disciplinano la gestione dei RAEE. I pannelli fotovoltaici sono entrati a far parte ufficialmente del novero dei RAEE non pericolosi con l'obiettivo di massimizzarne il riciclaggio.

La Direttiva del 2011 poneva dei vincoli all'uso di sei sostanze pericolose nella produzione di diverse categorie di apparecchiature elettriche e elettroniche: piombo, mercurio, cadmio, cromo esavalente, ritardanti di fiamma bifenili polibromurati (PBB) e etere di bifenile polibromurato (PBDE), al fine di contribuire alla tutela dell'ambiente e della salute umana. La legge disponeva che tali sostanze venissero sostituite da alternative maggiormente sicure, con la finalità dichiarata di aumentare anche la possibilità e la convenienza di avviare a riciclo/riuso i RAEE e diminuire, nel contempo, i rischi per la salute dei lavoratori degli impianti di riciclaggio. *Alcune apparecchiature tuttavia necessitano per il loro funzionamento di contenuti maggiori di quelli ritenuti ammissibili*, quindi una serie di apparecchiature sono state esentate da questi limiti. *I pannelli fotovoltaici, in ragione del loro apporto alla produzione di energia rinnovabile, sono stati inclusi nelle apparecchiature che possono avvalersi di detta esenzione.*

I moduli fotovoltaici utilizzano, per il proprio funzionamento, sostanze tossiche e inquinanti (seppur in minime quantità e ben incapsulate) e metalli rari. Sebbene durante il loro esercizio non si abbia emissione di inquinanti o rilascio di sostanze tossiche, per la loro dismissione c'è sicuramente bisogno di procedure e processi adeguati, in quanto uno smaltimento non corretto in discarica o l'avvio di alcune componenti agli inceneritori potrebbe favorire il rilascio delle sostanze dannose per l'uomo e inquinanti per l'ambiente. Anche se attualmente esenti dalle restrizioni della direttiva RoHS, sarebbe opportuno che le aziende concentrassero i propri sforzi sulla sostituzione delle sostanze regolamentate, in modo tale da semplificare il processo di riciclaggio e garantire una significativa riduzione dei rischi per l'ambiente e per la salute legati a tali sostanze. Alcune aziende, infatti, hanno cominciato ad utilizzare, ad esempio, saldature senza piombo o con concentrazione al di sotto dei limiti della RoHS e pasta di metallizzazione senza piombo. L'esenzione dalle restrizioni, tuttavia, conferisce alle aziende maggior tempo per la ricerca di soluzioni tecnologiche che portino all'eliminazione o alla riduzione del quantitativo di sostanze tossiche e inquinanti nei sistemi fotovoltaici, così da ridurre le problematiche e i costi relativi allo smaltimento.

---

<sup>10</sup> <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:037:0019:0023:it:PDF>

<sup>11</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0065&from=EN>

<sup>12</sup> <https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/testi/05151dl.htm>

<sup>13</sup> <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2014/03/28/14G00064/sg>

In Italia alla fine del loro ciclo di vita, i moduli sono differenziati in base alla potenza di picco erogabile (i moduli fino a 10 kWp sono considerati come rifiuti domestici) e al periodo di produzione/tecnologia utilizzata. I pannelli che provengono da impianti installati prima del D.Lgs. 49/2014 sono considerati in modo differente rispetto a quelli provenienti da impianti successivi, dal punto di vista della responsabilità ambientale (Malandrino *et al.*, 2017). Il Decreto stabilisce anche l'obiettivo minimo di recupero per i pannelli fotovoltaici del 75% in peso, con la prescrizione di avviarne almeno il 65% in peso al riciclo fino al 14 agosto 2015 e dell'80% in peso (con la prescrizione di avviarne almeno il 70% a riciclaggio) fino al 14 agosto 2018. Dal 15 agosto 2018 in poi, gli obiettivi minimi di recupero per i pannelli fotovoltaici sono indicati nella percentuale dell'85%, con preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio pari almeno all'80% (D. Lgs. n.49/2014 - Allegato V). 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 riciclaggio dei RAEE fotovoltaici. Questa norma è contenuta nel Collegato Ambientale alla Legge di Stabilità del 2015<sup>14</sup>, che prevede regolamenti di carattere ambientale al fine di promuovere misure di green economy e per il contenimento di un eccessivo uso delle risorse naturali. Alcuni consorzi utilizzano, seppur con modifiche, tecnologie già sviluppate nel settore dei RAEE. Queste tecnologie combinano il funzionamento manuale ad apparecchiature per la separazione automatica e consentono un elevato recupero di componenti con un ridotto impatto ambientale, attraverso il controllo dei flussi d'aria delle polveri derivanti dalla macinazione ecc.

#### **Principale legislazione Europea e italiana in vigore, relativa alle sostanze tossiche e nocive**

- **Direttiva comunitaria 2002/95/CE**<sup>15</sup> (comunemente detta RoHS - *Restriction of Hazardous Substances Directive*) e dei suoi aggiornamenti (**Direttiva 2011/65/UE**<sup>16</sup> - RoHS III – testo consolidato in base alle modifiche disposte dal **Decreto 17 gennaio 2020, in G.U. 29/02/2020, n. 51**<sup>17</sup>)
- **D. Lgs n.151/2005**<sup>18</sup>. Attuazione delle Direttive 2002/95/CE, 2002/96/CE e 2003/108/CE, relative alla riduzione dell'uso di sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche e elettroniche, nonché allo smaltimento dei rifiuti"
- **D.Lgs 3 aprile 2006, n. 152 (152/2006)**<sup>19</sup>. Norme in materia ambientale (GU n.88 del 14-4-2006 - Suppl. Ordinario n. 96) Testo Unico Ambientale (T.U.A.)
- **Regolamento (CE) n.1272/2008 del Parlamento Europeo e del Consiglio**<sup>20</sup> del 16 dicembre 2008 relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele che modifica e abroga le direttive 67/548/CEE e 1999/45/CE e che reca modifica al regolamento (CE) n. 1907/2006.
- **D.Lgs 3 dicembre 2010, n. 205**<sup>21</sup>. Disposizioni di attuazione della direttiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive (GU n.288 del 10-12-2010 - Suppl. Ordinario n. 269)
- **D.Lgs 49/2014**<sup>22</sup>. Attuazione della direttiva 2012/19/UE sui rifiuti di apparecchiature elettriche e elettroniche (RAEE).
- **Collegato Ambientale alla Legge di Stabilità del 2015** (Legge 28 dicembre 2015, n. 221)<sup>23</sup>

<sup>14</sup> Legge 28 dicembre 2015, n. 221 <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2016/01/18/13/sg/pdf>

<sup>15</sup> <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:037:0019:0023:it:PDF>

<sup>16</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0065&from=EN>

<sup>17</sup> <https://www.certifico.com/categorie/115-ebook/8792-direttiva-rohs-iii-testo-consolidato>

<sup>18</sup> <https://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/testi/05151dl.htm>

<sup>19</sup> <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2006-04-03;152|vig=>

<sup>20</sup> <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008R1272>

<sup>21</sup> <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2010-12-03;205>

<sup>22</sup> <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2014/03/28/14G00064/sg>

<sup>23</sup> <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2016/01/18/13/sg/pdf>



## Come è fatto un pannello fotovoltaico

Per capire il possibile impatto ambientale generato dal processo di dismissione di un pannello fotovoltaico, è necessario partire dall'analisi della struttura dello stesso. La struttura generale di un pannello fotovoltaico è composta da diodi che combinano due o più strati di materiali semiconduttori, utilizzati per creare un campo elettrico permanente all'interfaccia di giunzione tra gli strati.

Esistono diversi tipi di celle solari, corrispondenti a diversi materiali semiconduttori e disposizioni di strati. Generalmente, diverse celle sono collegate elettricamente, laminate con un incapsulante e inserite tra le coperture protettive anteriore e posteriore per formare un modulo solare. I moduli sono collegati tra loro per formare vettori fotovoltaici montati su strutture fissate sul terreno o su tetti e facciate di edifici. Il sistema fotovoltaico è poi completato con componenti necessari alla trasformazione dell'energia elettrica prodotta, come ad esempio gli inverter, che convertono la corrente continua in corrente alternata e viene utilizzata nella maggior parte degli apparecchi elettrici. Le tecnologie fotovoltaiche si basano su diversi tipi di moduli con strutture che variano in termini di materiali utilizzati, dimensioni, peso e prestazioni, in diverse fasi di maturità tecnologica.

Le principali tecnologie fotovoltaiche attualmente sul mercato, definite di prima generazione, si basano sul **Silicio cristallino** (c-Si) e rappresentano circa il 90% del mercato fotovoltaico (40% mono-cristallino, 48% policristallino e 2% Silicio a nastro, Malandrino *et al.*, 2017). Il restante 9% della quota di mercato è occupato dalle **tecnologie a film sottile** di seconda generazione (5% CdTe, 2% a-Si e 2% rame indio gallio diselenide – CIGS, Malandrino *et al.*, 2017). A causa della bassa efficienza, i prodotti basati su **Silicio amorfo** (a-Si) non sono quasi più in produzione.

<b>Prima generazione: Silicio cristallino</b>	
a)	Monocristallino
b)	Policristallino
d)	Silicio a nastro
<b>Seconda generazione: Film sottile</b>	
a)	Silicio amorfo (a-Si)
b)	Tellurio di Cadmio (CdTe)
c)	Celle multigiunzione
d)	Rame, Indio, Gallio diselenide (CIGS), Rame Indio diselenide (CIS)
<b>Terza generazione: Fotovoltaico a concentrazione (CPV) e altre tecnologie emergenti</b>	
a)	CPV
b)	Celle solari Dye-sensitised
c)	Celle solari organiche
d)	Celle ibride
e)	PERC e PERL

**Tabella 1:** Tipologie di celle fotovoltaiche (Paiano, 2015)

		% di riciclabilità del singolo pannello	2010	2015	2018	2020	2030
I Generazione	Silicio monocristallino	più dell'80% in peso	86%	92%	40%	73%	45%
	Silicio policristallino				48%		
	Silicio a stringa				2%		
II Generazione a film sottile	a-Si	90% per il vetro 95% materiale semiconduttore	13%	5%	2%	5%	5%
	CdTe				5%		
	CIS/CIGS				2%		
III Generazione	High-efficiency III–V multijunction cells based on gallium arsenide	dati non ancora disponibili	-	1%	1%	16%	44%
			100%	100%	100%	100%	100%

**Tabella 2:** Cambiamento delle percentuali di utilizzo nel tempo dei diversi tipi di pannelli solari (Elaborazione ENEA da: Malandrino *et al.* 2017; Sica *et al.*, 2017)

I moduli di terza generazione, basati principalmente su tecnologie come le celle dye-sensitized (basate su particolari sostanze coloranti fotosensibili) e le celle fotovoltaiche organiche, sono ancora allo stadio preindustriale. Le celle multi-giunzione III – V ad alta efficienza a base di **Arseniuro di gallio** sono utilizzate solo come prodotto di nicchia.

Le tecnologie di prima generazione basate sul silicio mono e policristallino (c-SI) avranno un'incidenza del 40% sui processi di riciclo/riuso, seguite da quelle del film sottile di seconda generazione, con un aumento costante di quelle che utilizzano silicio amorfo (a-Si), Tellururo di cadmio (CdTe) e Selenuro di indio-rame (CIS) o Selenide di gallio-indio-rame (CIGS). La durata utile dei moduli di terza generazione, basata su un tecnologie emergenti, pare attestarsi sui 25 anni<sup>24</sup>. Guardando più da vicino la struttura dei principali tipi di pannelli fotovoltaici, si possono individuare le componenti o le sostanze contenute che possono rappresentare un possibile elemento di impatto ambientale in fase di dismissione/riciclo/riuso dei materiali, in base ai materiali semiconduttori e ai processi produttivi impiegati.

Da un punto di vista produttivo, i moduli più comuni sono oggi delle due tipologie relative alla prima e alla seconda generazione, e più precisamente:

- moduli a celle fotovoltaiche (tecnologia al silicio cristallino);

<sup>24</sup> <https://solarenergyforum.com/solar-panel-efficiency-lifespan/>

- moduli al film sottile (tecnologia *thin film*).

Sono quindi queste due le tipologie che saranno riciclate in un futuro più prossimo.

Quando parliamo degli elementi costitutivi dei pannelli fotovoltaici, soprattutto in relazione agli elementi e composti chimici potenzialmente tossici o nocivi contenuti, va ricordato che i brevetti sulle tecnologie fotovoltaiche rilasciati a livello mondiale sono molteplici e molto differenti. Le industrie produttrici considerano i materiali e i processi industriali utilizzati nella costruzione dei loro prodotti come informazioni giustamente riservate (de Wild-Scholten & Alsema, 2005). A prescindere, quindi, dalla generale teoria legata alla costituzione delle diverse tipologie di pannelli fotovoltaici, il reale contenuto di elementi e composti chimici potenzialmente tossici o nocivi va desunto a posteriori sulla base di analisi chimico-fisiche dirette sui pannelli stessi, come vedremo meglio di seguito.

### **Tecnologia al silicio cristallino**

Nei moduli realizzati con tecnologia al silicio cristallino, il materiale impiegato per realizzare le celle fotovoltaiche è silicio purissimo stampato in celle di spessore di circa 0,2 mm, di forma quadrata con lato di 125 mm.

Le due tipologie di celle basate su questa tecnologia si differenziano in base al tipo di silicio utilizzato. Il silicio impiegato può essere di due tipologie:

- **Monocristallino:** Le celle in silicio monocristallino presentano un grado di maggiore purezza del materiale utilizzato e garantiscono le migliori prestazioni in termini di rendimento, a fronte però di un costo più elevato.
- **Policristallino:** Le celle in Silicio policristallino possono essere ottenute anche dal riciclaggio di materiale scartato dalla produzione di componentistica elettronica, rifiuto per ottenere barre cristalline compatte. In questo caso gli atomi risultano aggregati in piccoli grani monocristallini orientati in maniera casuale: la struttura pertanto rimane meno ordinata e omogenea e il materiale presenta un minor grado di purezza rispetto al silicio monocristallino.

Per entrambe le tipologie di silicio utilizzato si denotano caratteristiche e tecnologie realizzative simili. Le celle cristalline devono essere realizzate con spessori relativamente grandi sia perché sono piuttosto fragili (caratteristica che vincola la scelta del tipo di supporto su cui possono essere alloggiare), sia perché il silicio cristallino non presenta una significativa capacità di assorbimento della luce.

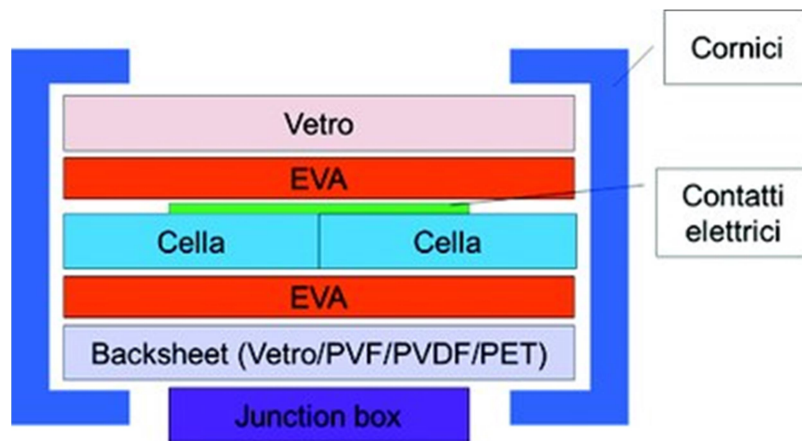


Figura 1: Struttura standard di un pannello al silicio cristallino (da: Tammaro *et al.*, 2016).

I moduli hanno una composizione standard costituita da vari strati:

- **Copertura Esterna:** è generalmente costituita da una **lastra di vetro temperato a basso tenore di ossido di ferro**, dotato di un elevato valore della trasmittanza nella banda del visibile e di una buona resistenza meccanica. La sua presenza garantisce il buon funzionamento e la durata del modulo, impedendo che l'acqua piovana, il vapore e le particelle inquinanti penetrino in esso danneggiandolo o riducendo la sua efficienza. Garantisce inoltre la protezione rispetto a possibili urti dovuti alla caduta della grandine o di altri materiali;
- **Sigillante anteriore:** è un foglio adesivo trasparente tramite il quale si fissano le celle al vetro di copertura. È costituito generalmente da uno strato di materiale polimerico, l'**EVA (etilene vinil-acetato)**, che garantisce contemporaneamente un buon isolamento dielettrico e la tenuta agli agenti esterni;
- **Celle e contatti:** è l'insieme delle celle fotovoltaiche collegate tra loro in serie e/o in parallelo e dei contatti che le connettono (*ribbon*). Queste connessioni sono realizzate mediante dei sottili nastri metallici (generalmente in **rame stagnato**) elettrosaldati, i cui terminali vengono fatti uscire dal laminato attraverso un foro sulla faccia posteriore del modulo;
- **Sigillante posteriore:** costituito da un altro foglio adesivo trasparente di EVA, posto sotto le celle e grazie al quale esse vengono fissate alla chiusura posteriore;
- **Chiusura posteriore:** lastra di chiusura che ha caratteristiche di tenuta simili a quella di chiusura superiore. Essendo la prestazione meccanica richiesta minore rispetto a quella della facciata superiore, normalmente si utilizza un rivestimento sintetico più economico del vetro, come il **Polivinilfluoruro (PVF)** noto commercialmente come Tedlar.

L'EVA, in origine traslucido e solido, si fonde diventando trasparente e si stende uniformemente tra le celle di silicio, per poi tornare solido una volta raffreddato. L'aria e il vapore presenti tra gli interstizi vengono eliminati, evitando così possibili processi di corrosione.

Il laminato così ottenuto viene poi completato con l'aggiunta di:

- **Cornice in alluminio:** serve da interfaccia tra il modulo e il supporto su cui verrà installato, è dotata di fori e asole che permettono il fissaggio del pannello tramite imbullonatura o agganciamento;

- **Scatola di giunzione:** collega le bandelle dei collegamenti delle celle fotovoltaiche tramite dei diodi di by-pass e realizza i collegamenti elettrici che saranno accessibili poi tramite cavi esterni utili per collegare il modulo ad altri moduli o al quadro elettrico finale.

## Tecnologia a film sottile

I moduli a film sottile sviluppati e disponibili sul mercato sono diversi:

- **Silicio Amorfo (a-Si)**

In questi moduli il film sottile è costituito da atomi di silicio, orientati in maniera casuale come avviene in un liquido, conservando però le caratteristiche dei corpi solidi. Tale materiale assorbe la luce più efficientemente del corrispettivo silicio cristallino, per cui lo spessore della cella in silicio amorfo può essere ridotto fino a 300 volte. Il rendimento di conversione dei moduli basati su tale tecnologia, inoltre, è indipendente dalle variazioni della temperatura d'esercizio.

- **CIS/CIGS**

Il materiale semiconduttore presente è un composto policristallino formato da **Diseleniuro di Indio Rame (CIS)**, eventualmente arricchito con **Gallio (CIGS)** per incrementarne le prestazioni e depositato in genere su un substrato di vetro.

- **CdTe**

Il semiconduttore impiegato è sempre un composto policristallino, il **Tellururo di Cadmio**, realizzato con tecnologie simili a quella utilizzata per i CIS. Le prestazioni attendibili da questa tecnologia sono ottime, ma la sua prospettiva di applicazione su larga scala è limitata dalle problematiche di smaltimento al termine del ciclo di vita del modulo, dal momento che il cadmio è molto tossico.

Anche i moduli fotovoltaici a film sottile sono composti da strati differenti di vari materiali:

- **Copertura Anteriore:** generalmente costituita da una lastra di vetro temperato. Può essere sostituita da **plexiglas** o da altri composti polimerici trasparenti qualora si voglia applicare il modulo su delle superfici ondulate e/o flessibili;
- **Strato conduttivo superiore:** è lo strato di ossido che funge da contatto anteriore e che viene depositato direttamente sulla copertura esterna. È generalmente costituito da **Ossido di Stagno o di Indio**;
- **Film sottile:** strato che "sostituisce" le celle in silicio cristallino. È costituito dal materiale che effettua la conversione fotovoltaica dell'energia (**a-Si, CdTe, CIS o CIGS**);
- **Contatto metallico posteriore:** strato che funge da contatto posteriore, generalmente costituito da un **mix di argento e alluminio**;
- **Sigillante posteriore:** foglio adesivo trasparente (costituito sempre da un foglio di **EVA**) che funge da isolante verso gli agenti esterni;
- **Chiusura posteriore:** strato dello stesso materiale della copertura anteriore.

Come si può vedere, i moduli fotovoltaici sono fatti di una serie di materiali, alcuni dei quali tossici, altri rari o addirittura preziosi. Più dell'80% del peso dei moduli è poi costituito da materiale di supporto o protezione (alluminio, EVA, vetro). Una corretta gestione del fine vita dei pannelli può portare al recupero di una quantità elevatissima di materiali, che può entrare in una nuova fase produttiva, secondo i dettami dell'economia circolare, sollevando molto del carico ambientale dovuto alla fase di estrazione dei materiali dall'ambiente naturale. Come si può vedere nella tabella seguente, con le moderne tecnologie è possibile oggi recuperare dal 75 al 100% dei materiali utilizzati. La percentuale cambia, ovviamente, a seconda dei materiali considerati.

<b>Materiali</b>	<b>x-Si (%)</b>	<b>CdTe (%)</b>	<b>CIGS/CIS (%)</b>	<b>Riciclabilità (%)</b>
Alluminio (Al)	17,5	-	-	100
Rame (Cu)	1,0	0,03	n.d.	78
EVA	12,8	3,00	3,00	n.d.
Silicio (Si)	2,9	-	-	85
Vetro	65,8	96,80	96,80	97
Cadmio (Cd)	-	0,08	-	99
Stagno (Sn)	-	0,02	-	99
Tellurio (Te)	-	0,07	-	95
Gallio (Ga)	-	-	0,01	99
Indio (In)	-	-	0,01	75
Molibdeno (Mo)	-	-	0,12	99
Selenio (Se)	-	-	0,01	80
Zinco (Zn)	-	-	0,04	90
Antimonio (Sb)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Bario (Ba)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cromo (Cr)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Arsenico (As)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Manganese (Mn)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Titanio (Ti)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Germanio (Ge)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Argento (Ag)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Nichel (Ni)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Piombo (Pb)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
TEDLAR - Polivinilfluoruro (PVF)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Plexiglass	-	-	-	n.d.

**Tabella 3:** Composizione dei pannelli fotovoltaici: % in peso dei materiali utilizzati e percentuale di riciclabilità. (-): assente. (n.d.): non determinato (elaborazione ENEA da: Fthenakis & Wang, 2006; Tammaro *et al.*, 2016; Sica *et al.*, 2018).

I materiali recuperati e inseriti in nuovi cicli produttivi, se trattati nel modo opportuno, non saranno potenziali generatori di impatti ambientali o sulla salute fino al successivo ciclo di smaltimento/trattamento/riuso.

## Impatto ambientale dei pannelli fotovoltaici

Il potenziale impatto ambientale generato dall'industria dei pannelli fotovoltaici parte dalla fase di reperimento di materie prime e dall'uso di risorse non rinnovabili per la loro costruzione, così come l'emissione di gas a effetto serra e la possibile contaminazione ambientale data da elementi costitutivi a potenziale elevato impatto ambientale in fase di dismissione. C'è da dire che questi elementi sono significativamente diminuiti nel tempo, grazie a metodi costruttivi sempre più efficienti e *eco-friendly* (Sica *et al.*, 2018). Questo graduale aumento dell'efficienza e dell'attenzione agli impatti ambientali nella costruzione dei pannelli fotovoltaici ha avuto un esito positivo non solo sulla riduzione dei costi di produzione, ma anche sulla gestione del fine vita. Ciò nonostante i pannelli fotovoltaici contengono sostanze che possono avere effetti negativi anche importanti sulla salute umana e sull'ambiente in generale.

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 <sub>2</sub> 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

**Tabella 4:** 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.

In particolare, i metalli pericolosi presenti nelle diverse tecnologie utilizzate per i moduli fotovoltaici sono riassumibili come di seguito:

Tecnologia fotovoltaica	Metalli
Silicio cristallino	Stagno, Piombo, Rame, Boro, Fosforo, Titanio, Argento, Alluminio
Silicio amorfo e microcristallino	Stagno, Piombo, Indio, Germanio, Zinco, Boro, Fosforo, Rame, Argento, Alluminio, Cromo
CdTe	Cadmio, Tellurio, Stagno, Indio, Rame, Piombo, Zolfo, Piombo, Argento
CIGS	Molibdeno, Rame, Indio, Gallio, Selenio, Cadmio, Zinco, Boro, Piombo, Argento, Alluminio

**Tabella 5:** Metalli potenzialmente pericolosi per l'ambiente e la salute in rapporto alle differenti tecnologie. Da: Tammaro *et al.*, 2014.

Tammaro *et al.* (2016), tuttavia, testimoniano come non sia possibile definire con esattezza il contenuto di metalli o sostanze pericolose contenute nei moduli fotovoltaici, in quanto la tecnologia ha subito una rapida evoluzione e tipologie simili di pannelli provenienti da aree geografiche differenti possono avere al loro interno differenti sostanze potenzialmente impattanti. Quindi, quando si parla di composizione dei pannelli fotovoltaici, occorre considerare che non ci si sta riferendo ad un standard ma ad una composizione tipica. Inoltre, poiché le tecnologie sono coperte da brevetti, spesso non è nemmeno possibile sapere in via teorica (senza effettuare dei saggi appositi) quali elementi siano effettivamente contenuti nei pannelli considerati.

Nello stesso lavoro, Tammaro *et al.* (2016) compiono un'interessante esperimento di ecotossicità legato al potenziale abbandono al suolo (senza trattamento) di pannelli c-Si e a film sottile (per il procedimento vedi Tammaro *et al.*, 2016). Le analisi sono state compiute su un batterio (*Vibrio fischeri*), un'alga (*Pseudokirchneriella subcapitata*) e un crostaceo (*Daphnia magna*). I risultati hanno mostrato ecotossicità nell'80% dei campioni provenienti dalla tecnologia al silicio cristallino. Per i campioni provenienti dalla tecnologia a film sottile, il 50% era ecotossico già al primo test, il 16,7% al secondo e l'8,3% al terzo. Da notare che una percentuale tra loro paragonabile di campioni analizzati della tecnologia C-Si (19,2%) e a film sottile (25%) erano stati classificati come non-ecotossici. In generale, comunque, l'organismo che si è dimostrato più sensibile ai saggi è stata l'alga *P. subcapitata*.

La tossicità è risultata positivamente correlata al contenuto dei metalli del campione utilizzato, e, in particolare, per la tecnologia a film sottile, alla presenza di Piombo e Cromo, mentre per la tecnologia c-Si al Piombo, allo Stagno, al Cadmio e, in misura minore, al Nichel e al Bario.



Da sottolineare il fatto, comunque, che studi sulla potenziale ecotossicità di lisciviati da rottami di pannelli fotovoltaici sono abbastanza scarsi. Inoltre, le differenti metodologie utilizzate per le analisi rendono difficile un confronto oggettivo tra i risultati ottenuti.

Bisogna, inoltre, sottolineare come i test di tossicità acuta qui descritti, che prevedono una esposizione temporalmente limitata ai metalli individuati in ambiente di laboratorio, non è confrontabile con una esposizione continuata della matrice ambientale agli stessi elementi. In questo caso, infatti si avrebbe nel tempo un rilascio potenzialmente totale nell'ambiente dei metalli pesanti, con un impatto ambientale decisamente maggiore di quello evidenziato nel lavoro su citato.

Proviamo ora a guardare più da vicino i singoli componenti e la loro pericolosità, da un punto di vista sia dell'impatto potenziale sulla salute che della tossicità.

Intanto va detto che per tossicità acuta si intende la proprietà di una sostanza o miscela di produrre effetti nocivi che si manifestano in seguito alla somministrazione per via orale o cutanea di una dose unica o di più dosi ripartite nell'arco di 24 ore, o in seguito ad una esposizione per inalazione di 4 ore (Regolamento (CE) n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS).

Le sostanze possono essere classificate in una delle quattro categorie di tossicità acuta per via orale, via cutanea o inalazione in base ai valori indicati nella tabella 6. I valori di tossicità acuta sono espressi in valori (approssimati) di DL50 (orale, cutanea) o CL50 (inalazione) o in stime della tossicità acuta (STA).

Via di esposizione	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4
<b>Orale</b> (mg/kg di peso corporeo)	STA≤5	5<STA≤50	50<STA<300	300<STA<2000
<b>Cutanea</b>	STA≤ 50	5<STA≤200	200<STA≤1000	1000<ST≤2000
<b>Gas</b> (ppm per volume di gas)	STA≤100	100<STA≤500	500<STA≤2500	2500<STA≤20.000
<b>Vapori (mg/l)</b>	STA≤0,5	0,5<STA≤2,0	2,0<STA≤10,0	10,0<STA≤20,0
<b>Polveri e nebbie (mg/l)</b>	STA≤0,05	0,05<STA≤0,5	0,5<STA≤1,0	1,0<STA≤5,0

**Tabella 6:** Categorie di pericolo di tossicità acuta e corrispondenti stime della tossicità acuta (STA) (da: Regolamento CE n. 1272/2008 CLP - Normativa RoHS – Parte 3: Pericoli per la salute).

### Alluminio (Al)<sup>25,26</sup>

L'alluminio è un elemento presente in quantità considerevoli nella biosfera, dove tutti gli esseri viventi sono esposti a potenziali effetti tossici. La neurotossicità di questo metallo è nota da più di un secolo. Recentemente l'alluminio è stato indicato come fattore eziologico di alcune manifestazioni patologiche (tra cui encefalopatia, osteopatia e anemia) associate al trattamento dialitico. Inoltre è stato ipotizzato che

<sup>25</sup> [http://www.salute.gov.it/imgs/C\\_17\\_pubblicazioni\\_2608\\_allegato.pdf](http://www.salute.gov.it/imgs/C_17_pubblicazioni_2608_allegato.pdf)

<sup>26</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.028.248>

L'alluminio possa essere un cofattore nell'eziopatogenesi di alcune malattie neurodegenerative, tra cui la malattia di Alzheimer, sebbene una prova diretta in questo senso sia ancora controversa. Tuttavia, la neurotossicità da alluminio è accertata negli animali da esperimento e nei pazienti con insufficienza renale (conseguente all'età o alla presenza di malattie renali) e ci sono i presupposti per ipotizzare un legame tra esposizione all'alluminio e patologie neurodegenerative. Inoltre sono state evidenziate associazioni tra elevati livelli di alluminio in alcune preparazioni alimentari per neonati e nelle soluzioni per la nutrizione parenterale domiciliare con possibili complicanze neurologiche e ossee, caratterizzate da una riduzione della velocità di sintesi ossea.

Sulla base degli effetti neurotossici EFSA ha definito una dose settimanale tollerabile (TWI) pari a 1 mg/kg p.c./settimana, corrispondente a 20 e 70 mg di alluminio/settimana, rispettivamente, per un bambino di 20 kg e per un adulto di 70 kg.

L'effetto sulla salute è determinato dalla dose (quanto) e dalla durata (quanto a lungo) e dalla via di esposizione<sup>27</sup>.

**Classificazione secondo il Regolamento (CE) n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS**

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Alluminio (Al)</b>	Non classificato come pericoloso	Sistema nervoso centrale Demenza Perdita della memoria Indebolimento Severo tremore	

**Argento (Ag)<sup>28,29</sup>**

L'argento puro è quasi bianco, brillante, morbido, molto duttile, malleabile e un eccellente conduttore di calore e di elettricità. Non è un metallo chimicamente attivo, ma è, tuttavia, attaccato da acido nitrico nella formazione del nitrato e da acido solforico concentrato caldo. La conduttività elettrica è la maggiore rispetto a tutti gli altri metalli, ma il suo costo elevato ha impedito che si diffondesse nelle applicazioni elettriche. L'impiego principale dell'argento è come metallo prezioso e suoi sali alogenuri, specialmente il nitrato di argento, sono ampiamente usati anche in fotografia. È usato principalmente in fotografia, industria elettrica e elettronica e per la realizzazione di posate, gioielli e specchi, insieme ad altri elementi. In generale, l'accumulo di argento nelle piante terrestri dai suoli è basso, anche se il terreno viene modificato con fanghi di depurazione contenenti argento o le piante vengono coltivate su terreni sterili provenienti dalle miniere d'argento, dove l'argento si accumula principalmente a livello dei sistemi radicali. Non sono stati trovati dati sugli effetti dell'argento su uccelli selvatici o mammiferi. Mammiferi di laboratorio sensibili sono stati

<sup>27</sup> <https://www.atsdr.cdc.gov/toxguides/toxguide-22.pdf>

<sup>28</sup> <http://www.inchem.org/documents/cicads/cicads/cicad44.htm#6.0>

<sup>29</sup> <https://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxsubstance.asp?toxid=97#12>

influenzati negativamente a concentrazioni di argento totali pari a 250 µg / litro in acqua potabile, 6 mg / kg nelle diete o 13,9 mg / kg di peso corporeo. Tuttavia, il significato è difficile da valutare per quanto riguarda l'ambiente naturale, date le incertezze riguardo all'esposizione e alla biodisponibilità.

**Classificazione secondo il Regolamento (CE) n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS**

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Argento (Ag)</b>	Bassa tossicità ambientale	Anomalie cardiache Danni al sistema nervoso	

**Arseniuro di gallio (GaAs)<sup>30</sup>**

L'Arseniuro di Gallio è un materiale inorganico composto dagli elementi Arsenico e Gallio. È un semiconduttore III/V, caratterizzato da un'alta mobilità dei portatori liberi di carica (elettroni e lacune) e da una banda di energia proibita diretta. Per questo motivo è usato in dispositivi come circuiti integrati ad altissima frequenza (microonde), diodi emettitori di luce infrarossa, diodi laser, celle solari, e nelle *Optical windows*. A testimonianza della grande importanza di questo materiale, è possibile consultare in letteratura una amplissima bibliografia sulle proprietà del GaAs (Blakemore, 1992).

Per quanto riguarda gli aspetti legati alla tossicità del composto, la principale via di assunzione individuata per l'Arseniuro di Gallio è quella respiratoria, ma una via secondaria è stata individuata anche nel tratto gastrointestinale. Questo composto presenta lo stesso pericolo potenziale per i lavoratori dell'esposizione all'arsenico, noto cancerogeno. NIOSH (1984) raccomanda di controllare l'esposizione dei lavoratori all'arseniuro di gallio osservando NIOSH REL per l'arsenico inorganico (2 µg / m<sup>3</sup> di aria come tetto massimo per 15 minuti) (NIOSH 1975, 1982). NIOSH raccomanda inoltre di stimare la concentrazione di arseniuro di gallio nell'aria mediante determinazione dell'arsenico. Questo può essere fatto usando il metodo NIOSH 7900 per l'arsenico (NIOSH, 1984)<sup>31</sup>.

**Classificazione secondo il Regolamento (CE) n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS**

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Arseniuro di gallio</b>	Altamente tossico per organismi acquatici	Edema polmonare; Polmonite; Sviluppo di tumori polmonari; Danni renali, al fegato, alla vescica, al sistema immunitario e al sistema circolatorio. Aumento nella frequenza degli aborti spontanei e del tasso di malformazioni e nati morti; Effetto genotossico; Effetto cancerogeno	

<sup>30</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.013.741>

<sup>31</sup> <https://www.cdc.gov/niosh/docs/88-100/>

## Bromurati<sup>32,33</sup>

I ritardanti di fiamma bromurati (BFR) sono miscele di sostanze chimiche artificiali che vengono aggiunte a un'ampia gamma di prodotti, anche per uso industriale, per renderli meno infiammabili. Sono spesso impiegati nelle realizzazioni di materiali plastici, di articoli tessili e nelle apparecchiature elettriche/elettroniche.

Esistono cinque classi principali di BFR, elencate di seguito con l'indicazione degli usi più comuni:

- Eteri bifenili polibromurati (PBDE) – plastiche, articoli tessili, corpi elettronici, sistemi di circuiti
- Esabromociclododecani (HBCDD) – isolamento termico nell'edilizia
- Tetrabromobisfenolo A (TBBPA) e altri fenoli – circuiti stampati, termoplastiche (soprattutto nei televisori)
- Bifenili polibromurati (PBB) – dispositivi di largo consumo, articoli tessili, schiume plastiche
- Altri ritardanti di fiamma bromurati.

Queste classi di BFR sono state commercializzate come miscele a uso tecnico, con marchi commerciali diversi, costituite da vari composti chimici per ciascuna classe.

Nell'Unione europea (UE) l'uso di alcuni BFR è vietato o limitato; tuttavia, a causa della loro persistenza nell'ambiente, tali sostanze chimiche continuano a destare timori per i rischi che comportano per la salute pubblica. I prodotti trattati con BFR, ancora in uso o sotto forma di rifiuti, lasciano "filtrare" i BFR nell'ambiente e contaminano l'aria, il suolo e l'acqua. Questi contaminanti possono successivamente penetrare nella catena alimentare, dove si rinvencono soprattutto negli alimenti di origine animale come il pesce, la carne, il latte e i prodotti derivati.

I valori di concentrazione nell'aria immediatamente pericolosi per la vita o la salute (IDLH) sviluppati dall'Istituto Nazionale per la sicurezza e la salute sul lavoro (NIOSH)<sup>34</sup>, caratterizzano queste concentrazioni e condizioni di esposizione ad alto rischio [NIOSH 2013]. I valori IDLH si basano su una durata di esposizione di 30 minuti e sono tradizionalmente serviti come componente chiave della logica decisionale per la selezione dei dispositivi di protezione delle vie respiratorie [NIOSH 2004].

### Classificazione secondo il Regolamento (CE) n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Bromurati ritardanti di fiamma (BFR) Bifenil polibromurati (PBB) Difenil-etere polibromurati (PBDE)</b>	Tossico per ambienti acquatici	Tossico Cancerogeno	Si accumulano nei tessuti adiposi

<sup>32</sup> <https://www.efsa.europa.eu/it/topics/topic/brominated-flame-retardants>

<sup>33</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.028.890>

<sup>34</sup> <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2017-106/pdfs/2017-106.pdf?id=10.26616/NIOSH PUB2017106>

## Cadmio (Cd)<sup>35</sup>

Il Cadmio è utilizzato maggiormente nei moduli a film sottile al CdTe, ma viene impiegato anche come sostanza “riempitiva” tra i diversi strati nei moduli al CIGS. Esposizioni a livelli anche bassi di questo elemento possono portare a malattie gravi. È un metallo pesante come il piombo e ha un tasso di accumulo nel corpo umano molto elevato, con un tempo di smaltimento medio di circa 30 anni.

La tossicità del cadmio per animali, piante e esseri umani è stata ampiamente documentata negli ultimi anni: l'eccessivo accumulo di questo metallo provoca clorosi nelle piante e necrosi, tossicità o morte negli animali. Il Cadmio può penetrare nel terreno, nelle acque sotterranee e in quelle superficiali a seguito di lisciviazione, in caso di abbandono in discarica e successiva rottura dei pannelli che lo contengono, oppure può essere rilasciato in atmosfera attraverso le emissioni degli inceneritori. Gli inceneritori usano, in genere, filtri che catturano il Cadmio, ma le ceneri prodotte nel processo di incenerimento possono ancora rilasciare Cadmio a seguito di lisciviazione se smaltite in discarica. Nell'uomo, gli effetti dell'intossicazione acuta portano a debolezza, febbre e vomito, mentre gli effetti dell'intossicazione cronica portano a enfisema polmonare, disfunzione renale e danni all'apparato scheletrico.

L'Amministrazione americana per la salute e la sicurezza sul lavoro (OSHA)<sup>36</sup> ha limitato l'esposizione dei lavoratori a una media di 5 µg/m<sup>3</sup> per una giornata lavorativa di 8 ore per 40 settimane lavorative.

### Classificazione secondo il Regolamento CE n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Cadmio (Cd)</b>	Ecotossico e pericoloso	Irritazione delle vie respiratorie Danni renali Enfisema polmonare Danni all'apparato scheletrico Possibili danni neurotossici Possibili danni fetali Potenzialmente genotossico Cancerogeno	Effetti sull'ambiente, sulle acque superficiali e sotterranee. Il Cadmio viene assorbito attraverso l'alimentazione e la respirazione

## Solfuro di Cadmio (CdS)<sup>37</sup>

Il solfuro di cadmio è un composto a reticolo covalente di cadmio e di zolfo.

A temperatura ambiente si presenta come un solido di colore giallo-arancio. È un composto tossico, pericoloso per l'ambiente, in quanto potenziale fonte di inquinamento da Cadmio. L'utilizzo del Solfuro di

<sup>35</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.028.320>

<sup>36</sup> <https://www.atsdr.cdc.gov/toxfaqs/tfacts5.pdf>

<sup>37</sup> IFA – GESTIS Database [http://gestis-en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis\\_en/000000.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$vid=gestiseng:sdbeng\\$3.0](http://gestis-en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/000000.xml?f=templates$fn=default.htm$vid=gestiseng:sdbeng$3.0)

Cadmio, sensibile alla luce, permette di diminuire la resistenza elettrica, anche se presenta dei limiti legati all'effetto memoria. Viene anche utilizzato per realizzare dei pigmenti fotosensibili.

Le principali vie di assunzione del Cadmio solfuro sul luogo di lavoro sono attraverso il tratto respiratorio e, in misura minore, attraverso il tratto gastrointestinale. Il composto può essere anche inalato come polvere o legato a particelle.

Il solfuro di cadmio è elencato come numero indice 048-010-00-4 nel regolamento (CE) n. 1272/2008 e classificato nell'allegato VI, parte 3, tabella 3.1 (elenco di classificazione e etichettatura armonizzate di sostanze pericolose) come cancerogeno, Carc. 1B (H350: "Può provocare il cancro")<sup>38</sup>.

**Classificazione secondo il Regolamento (CE) n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS**

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>CdS (Solfuro di cadmio)</b>	Rilascio di cadmio per effetto di dissoluzione	Edema/enfisema polmonare Polmonite Danno ai reni Danno alle ossa Cancerogeno Possibili danni al feto	in discarica: possibile contaminazione delle falde.

**Cromo (Cr)**<sup>39,40</sup>

Il cromo è un metallo che si trova abbondantemente in natura in complesso con altre sostanze chimiche. Può essere presente in diverse forme che hanno specifiche proprietà chimico-fisiche e tossicologiche. Le due forme più stabili, e quindi più comuni, sono il cromo trivalente - Cr(III) - e il cromo esavalente - Cr(VI) -. Il cromo è utilizzato soprattutto nelle leghe e ha un'ampia varietà di applicazioni. Il Cr(III) e il Cr(VI) sono utilizzati come rivestimenti metallici, in genere lavorati mediante processi galvanici per fornire resistenza alla corrosione e produrre un rivestimento lucido. Sono utilizzati in smalti e vernici, come catalizzatori nelle tinture e nell'annerimento del cuoio e per la conservazione del legno. Il Cr(VI) è più tossico e l'esposizione per via inalatoria, quando presente in alte concentrazioni, può provocare irritazione, ulcerazioni del naso, problemi respiratori, eruzioni cutanee, indebolimento del sistema immunitario e danni allo stomaco, fegato e polmoni. L'esposizione per inalazione in ambienti di lavoro è associata all'insorgenza di cancro del polmone, dei seni nasali e del naso. La permanenza del cromo nei tessuti polmonari, una volta inalato, può arrivare a svariati anni. L'assorbimento può avvenire anche a seguito del contatto con la pelle o per via intestinale in caso di assunzione di cibi e bevande contaminati.

<sup>38</sup> <https://echa.europa.eu/documents/10162/2aceee75-6b50-416c-aa30-d3131c5eeee3>

<sup>39</sup> [http://www.salute.gov.it/portale/temi/documenti/acquepotabili/parametri/scheda\\_CROMO.pdf](http://www.salute.gov.it/portale/temi/documenti/acquepotabili/parametri/scheda_CROMO.pdf)

<sup>40</sup> [https://echa.europa.eu/documents/10162/13641/carcinogenicity\\_dose\\_response\\_cr\\_vi\\_report\\_en.pdf/7158ab67-0801-4307-bf5b-30c75c15518e](https://echa.europa.eu/documents/10162/13641/carcinogenicity_dose_response_cr_vi_report_en.pdf/7158ab67-0801-4307-bf5b-30c75c15518e)

Classificazione secondo il Regolamento (CE) n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS

<b>FINE VITA PANNELLI</b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Cromo (Cr)</b>	Sostanza pericolosa per l'ambiente acquatico	Irritazione e corrosione delle mucose (anche a livello respiratorio) e della pelle Edema polmonare, polmoniti Danno ai reni, al sangue e al fegato Sensibilizzazione cutanea, malattie allergiche della pelle Cancerogeno	Rilascio nei reflui

### Gallio (Ga)<sup>41</sup>

Il Gallio, chimicamente simile all'alluminio, risulta però debolmente più acido di questo. Il Gallio forma facilmente leghe con molti metalli. Con l'alluminio forma un eutettico che fonde a 26,3°C; l'alluminio commerciale contiene una piccola quantità di gallio come impurezza. Il Gallio forma leghe (binarie e ternarie) basso fondenti con stagno e indio; si miscela con lo stagno in tutte le proporzioni.

Classificazione secondo il Regolamento (CE) n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS

<b>FINE VITA PANNELLI</b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Gallio (Ga)</b>	Non classificato come <i>tossico</i> per l'ambiente	Danni cerebrali, ai polmoni, ai reni, al fegato.	

### Germanio (Ge)<sup>42</sup>

Il Germanio puro è un metalloide duro, luccicante, grigio-bianco, fragile con una struttura cristallina simile a quella del diamante. È simile nelle proprietà chimiche e fisiche al silicio. Il Germanio è stabile in aria e acqua e resta inalterato da alcali e acidi, tranne dall'acido nitrico. Il Germanio è molto importante come semiconduttore. I transistori e i circuiti integrati costituiscono il maggiore impiego dell'elemento; sono fatti spesso di Germanio con piccoli importi di Arsenico, Gallio o di altri metalli aggiunti. Il Germanio può formare molti composti. L'ossido di germanio è aggiunto al vetro per aumentare l'indice di rifrazione; tale vetro è usato in obiettivi grandangolo e in dispositivi a infrarossi. Sono state realizzate numerose leghe che contengono Germanio. I rivelatori a monocristallo del Germanio a elevata purezza possono identificare precisamente le sorgenti di radiazione e vengono utilizzati, ad esempio, nella sicurezza aeroportuale. Secondo la classificazione fornita dalle aziende all'ECHA nelle registrazioni REACH<sup>43</sup>, questa sostanza è

<sup>41</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.028.330>

<sup>42</sup> <https://www.lenntech.it/periodica/elementi/ge.htm#ixzz653ZTxdWK>

<sup>43</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.028.331>

molto tossica per la vita acquatica; è tossica per la vita acquatica con effetti di lunga durata; è sospettata di nuocere alla fertilità o al feto e può causare danni agli organi in caso di prolungamento o ripetizione esposizione.

**Classificazione secondo il Regolamento CE n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS**

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Germanio (Ge)</b>	Sospetti effetti negativi su ecosistemi acquatici	Sovraesposizione: irrita gli occhi, la pelle e le prime vie respiratorie.	

**Indio (In)<sup>44</sup>**

L'Indio è un metallo morbido, duttile, malleabile e brillante. È liquido in una vasta gamma di temperature, come il Gallio che appartiene al suo stesso gruppo. Sia l'Indio che il Gallio possono bagnare il vetro. L'Indio è stabile in aria e in acqua ma si dissolve in acidi. Una volta riscaldato ad di sopra del suo punto di fusione prede fuoco e brucia con una fiamma viola. L'Indio è usato in leghe a bassa fusione e come piastra protettiva per i cuscinetti e altre superfici metalliche. Può essere usato per formare la superficie resistente alla corrosione degli specchi: quando evaporato e lasciato depositare sul vetro produce uno specchio di qualità tanto buona quanto quella dell'argento. I fogli di indio sono usati per valutare che cosa accade all'interno dei reattori nucleari. Per concludere, è usato come filtro chiaro in lampade a sodio a bassa pressione di vapore. Secondo la classificazione fornita dalle aziende all'ECHA nelle registrazioni REACH<sup>45</sup>, questa sostanza provoca danni agli organi in caso di esposizione prolungata o ripetuta ed è tossica per gli organismi acquatici con effetti di lunga durata.

**Classificazione secondo il Regolamento CE n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS**

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Indio (In)</b>	tossica per gli organismi acquatici con effetti di lunga durata	Non sono disponibili dati sufficienti sull'effetto sulla salute umana. Sospettato di provocare danni agli organi in caso di esposizione prolungata.	

**Molibdeno (Mo)<sup>46</sup>**

Il Molibdeno è un metallo di transizione bianco argenteo e molto duro. Può essere confuso con la grafite e il minerale di piombo. È usato in certe leghe a base di nichel, termoresistenti e resistenti alla corrosione in

<sup>44</sup> <https://www.lenntech.it/periodica/elementi/in.htm#ixzz653Zqr12F>

<sup>45</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.028.345>

<sup>46</sup> <https://www.lenntech.it/periodica/elementi/mo.htm#ixzz653a6nd8k>



soluzioni chimiche. Il Molibdeno si ossida ad elevate temperature. Il metallo ha trovato recente applicazione negli elettrodi per fornaci in vetro elettricamente riscaldate.

**Classificazione secondo il Regolamento CE n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS**

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Molibdeno (Mo)</b>	Potenzialmente tossico a dosi elevate	Provoca grave irritazione oculare; Può irritare le vie respiratorie. Sospettato di (ma non classificato di) essere cancerogeno	L'esposizione avviene soprattutto per via aerea o per ingestione

**Nichel (Ni)**<sup>47, 48</sup>

Il Nichel è un metallo presente in diversi minerali, nei suoli (compresi i fondali dell'oceano) e tra i componenti delle emissioni vulcaniche. Di colore bianco, duro, facilmente lavorabile e d'aspetto simile all'argento, è spesso combinato con altri metalli (come ferro, rame, cromo e zinco) per formare leghe metalliche, a cui conferisce caratteristiche di durezza, resistenza alla corrosione e al calore. Il Nichel è largamente presente nei prodotti alimentari che ne contengono naturalmente piccole quantità, ma non si accumula nei tessuti dei pesci o di altri animali, inclusi nella nostra dieta alimentare. Il contenuto di Nichel può essere invece rilevante in alcune verdure.

**Classificazione secondo il Regolamento CE n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS**

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Nichel (Ni)</b>	Tossico ad alte dosi	Fumi e polveri di solfuro di nichel sono considerati cancerogeni. Embolia polmonare, Asma, Bronchite cronica Dermatiti allergiche Problemi cardiaci Tossico se ad alte dosi	Ampia diffusione ambientale. A seguito di rilasci nell'ambiente si accumula sia sul terreno che in acqua.

**Piombo (Pb)**<sup>49,50</sup>

Il Piombo viene utilizzato principalmente nei pannelli al silicio cristallino. È contenuto nello stagno con cui le celle solari sono legate ed è una componente della pasta d'argento usata nel processo di metallizzazione.

<sup>47</sup> <https://www.lenntech.it/periodica/elementi/ni.htm>

<sup>48</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.028.283>

<sup>49</sup> Paiano, 2015. Malandrino et al., 2017

<sup>50</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.028.273>

Si tratta di un metallo pesante con un alto potenziale di accumulo nell'ambiente e nell'essere umano: una volta entrato a contatto con il corpo umano si distribuisce in questo tramite la circolazione sanguigna, accumulandosi nei tessuti e nelle ossa. A seconda della percentuale in cui è presente risulta essere molto pericoloso e può causare problemi cardiovascolari, ai reni, al sistema immunitario e all'apparato nervoso. Nell'ambiente in cui si diffonde invece può causare una perdita di biodiversità, una diminuzione del tasso di sviluppo e effetti nocivi su animali e piante. Il piombo ha diversi effetti biochimici e fisiologici, poiché interferisce con alcuni enzimi e può causare paresi periferica e danni al sistema nervoso centrale (mal di testa, tremori, irritabilità, allucinazioni, perdita di memoria, coma ecc.), al sistema cardiovascolare, al sistema endocrino, ai reni ecc. La quantità di piombo presente nei moduli c-Si varia da 1,64 a 11,4 g per pannello. Inoltre, il potenziale per la lisciviazione del piombo varia dal 13% in condizioni di pH 6-7, fino al 90% in presenza di pH 3-4. I costi relativi all'inquinamento causato dalla lisciviazione di materiali contenenti piombo impropriamente smaltiti sono stati approssimativamente stimati in 1174 €/kg. Sulla base di tale valutazione, è possibile prevedere che, nel 2050, lo smaltimento improprio di 2151 tonnellate di piombo contenuto principalmente nei moduli c-Si (che hanno una lisciviazione media di 1741,2 t) può avere un costo di oltre 2 miliardi di €. (Paiano, 2015). Tamaro *et al.* (2016) notano come in questi ultimi anni nei pannelli c-Si di nuova costruzione la quantità di piombo presente (e quindi potenzialmente liberabile nell'ambiente naturale per lisciviazione di pannelli rotti) è minore rispetto ai pannelli più vecchi, questo grazie alla sostituzione del piombo con composti dell'argento che risultano meno impattanti.

**Classificazione secondo il Regolamento CE n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS**

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Piombo (Pb)</b>	si ritrova praticamente in tutte le matrici biologiche e ambientali. Altamente tossico. Dà luogo a fenomeni di magnificazione biologica e entra nella catena alimentare.	Tossicità per il sistema nervoso centrale e periferico Disfunzioni e danni del fegato Danni al sistema riproduttivo, al sangue e all'apparato gastrointestinale. Danni fetali	Tossicità acuta soprattutto per inalazione di vapori

**Rame (Cu)<sup>51,52</sup>**

Il Rame è un metallo rosato o rossastro, di conducibilità elettrica e termica elevatissime, superate solo da quelle dell'argento; è molto resistente alla corrosione; è facilmente lavorabile, estremamente duttile e malleabile. La produzione di Rame nel mondo è in continua crescita e di conseguenza la sua diffusione nell'ambiente è in continuo aumento: nei fiumi avviene continuo deposito di fanghi contaminati per lo scarico di acque reflue contenenti rame. Anche nell'aria la presenza di Rame è aumentata a causa dell'impiego di combustibili fossili. Per colpa delle precipitazioni, il Rame viene depositato nel terreno, dal

<sup>51</sup> [http://www.salute.gov.it/imgs/C\\_17\\_pubblicazioni\\_2060\\_allegato.pdf](http://www.salute.gov.it/imgs/C_17_pubblicazioni_2060_allegato.pdf)

<sup>52</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.028.326>

quale può venire assorbito dalle piante dove può accumularsi anche in grandi quantità. In terreni fortemente contaminati solamente poche piante riescono a sopravvivere: per questo motivo la contaminazione da Rame del suolo costituisce una grave minaccia per i terreni agricoli. L'attività dei microrganismi può subire una notevole inibizione, rallentando di fatto la decomposizione della sostanza organica. L'assorbimento di Rame da parte delle piante provoca il suo ingresso nella catena alimentare direttamente se l'utilizzatore primario è l'uomo, oppure indirettamente, se la pianta è utilizzata come foraggio in zootecnia.

**Classificazione secondo il Regolamento (CE) n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS**

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Rame (Cu)</b>	Tossico per l'ambiente. si deposita nel terreno creando seri rischi per acqua, terra e microorganismi . Il rame si accumula nel fegato e può essere rilasciato a livello sistemico in caso di stress	Irritazione delle vie aeree Disturbi gastrointestinali Dermatiti Irritazione delle mucose	Assunto attraverso le vie respiratorie, il cibo e l'acqua. L'assorbimento per via parenterale avviene solo in seguito a solubilizzazione.

**Selenio (Se)<sup>53,54</sup>**

Il Selenio è un non metallo chimicamente affine allo zolfo e al tellurio. Esiste in diverse forme allotropiche, di cui una stabile dall'aspetto grigio e simile ad un metallo; in questa forma il selenio possiede una resistenza elettrica inferiore quando è esposto alla luce, pertanto trova impiego nella realizzazione delle fotocellule.

Il Selenio è fondamentale in piccole quantità per l'alimentazione dell'uomo e degli animali, ma in quantità maggiori può causare danneggiamento del sistema nervoso, affaticamento e l'irritabilità. Il Selenio dà luogo a fenomeni di accumulo nei tessuti degli esseri viventi, portando ad un elevato contenuto nei pesci e in altri organismi e causando gravi problemi di salute negli esseri umani a seguito di una sovraesposizione nel corso dell'intera vita.

**Classificazione secondo il Regolamento (CE) n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS**

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Selenio (Se)</b>	Fenomeni di accumulo nei tessuti di pesci e di altri organismi.	Danni al Sistema Nervoso, affaticamento, irritabilità Irritazione delle vie respiratorie/broncospasma Irritazione delle mucose,	Negli ambienti di lavoro il Selenio può essere assorbito soprattutto per inalazione.

<sup>53</sup> <https://www.lenntech.it/processi/pesanti/metalli-pesanti/metalli-pesanti.htm#ixzz653bpRpcf>

<sup>54</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.029.052>

		delle membrane, pericolo di danni polmonari Sintomi gastrointestinali quali la nausea o diarrea Reazioni allergiche cutanee Possibile cancerogenicità	Particolarmente tossico nelle forme di Seleniuro di idrogeno Diossido del selenio, Selenito di sodio Solfuro di selenio.
--	--	--	---

### Silicio (Si)<sup>55, 56</sup>

Il Silicio è l'elemento elettropositivo più abbondante nella crosta terrestre. È un metalloide con un profondo splendore metallico e molto fragile. Può essere tetravalente o anche bivalente, ed è puramente elettropositivo nel suo comportamento chimico. Inoltre, sono noti composti pentacoordinati e esacoordinati del silicio. Il silicio è la componente principale di vetro, cemento, ceramiche, della maggior parte dei dispositivi a semiconduttore, e dei siliconi, una sostanza plastica confusa spesso con il silicone. Il silicone è inoltre un costituente importante di alcuni acciai e un ingrediente importante nei mattoni. È un materiale refrattario usato per la realizzazione di smalti e terraglie. Il diossido di silicio è usato come materia prima per produrre il silicio elementare e carburo di silicio. Grandi cristalli di silicio sono usati per i vetri piezoelettrici. I vetri di silicio sono usati in laboratorio e negli impianti chimici, così come negli isolanti elettrici.

#### Classificazione secondo il Regolamento CE n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Silicio (Si)</b>	Bassa tossicità per ambiente	Possibili danni polmonari per inalazione. Irritante per la pelle e gli occhi. Cancro polmonare e malattie renali associate ad esposizione professionale	

### Stagno (Sn)<sup>57</sup>

Lo stagno è un metallo malleabile e molto duttile bianco argenteo. Resiste bene alla corrosione da acqua marina, da acqua distillata e da acqua potabile, ma può essere attaccato da acidi forti, da alcali e da sali acidi. Lo Stagno agisce da catalizzatore in presenza di ossigeno disciolto nell'acqua e accelera l'attacco chimico, ma non è facilmente ossidato e resiste alla corrosione perché è protetto da una pellicola di ossido.

Le leghe di Stagno sono usate in molti modi: per saldare, per connettere tubi o circuiti elettrici, come peltro, come metallo per campane, per amalgami dentali. Lo Stagno in singoli atomi o molecole non è molto tossico per alcun tipo di organismo; la forma tossica è la forma organica, che nonostante la sua pericolosità è molto utilizzata, ad esempio nell'industria delle vernici, nelle industrie plastiche e in agricoltura negli antiparassitari. I composti organici dello Stagno possono mantenersi nell'ambiente per un lungo periodo di

<sup>55</sup> <https://www.lenntech.it/periodica/elementi/si.htm#ixzz653f2mB00>

<sup>56</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.028.678>

<sup>57</sup> <https://www.lenntech.it/periodica/elementi/sn.htm#ixzz653fUY9te>

tempo, in quanto molto persistenti e non molto biodegradabili. I microrganismi hanno molta difficoltà nello scindere i composti di Stagno organico che si accumulano nell'acqua e nei terreni.

**Classificazione secondo il Regolamento CE n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS**

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Stagno (Sn)</b>	Danni agli ecosistemi acquatici	Irritazione a occhi e pelle Malessere generico Mal di testa Depressione Danni al fegato Malfunzionamento del sistema immunitario Genotossicità	Assorbimento soprattutto per via alimentare

**Tellurio (Te)<sup>58,59</sup>**

Il Tellurio è un elemento semimetallico, brillante, cristallino, fragile, argento-bianco. È solitamente disponibile come polvere grigia scura, ha sia le proprietà dei metalli che dei non metalli. Il Tellurio forma molti composti che corrispondono a quelli dello Zolfo e del Selenio. Una volta bruciato in aria, il Tellurio forma una fiamma blu-verdastra e forma il Diossido di tellurio. Il Tellurio non è affetto da acqua o da acido cloridrico, ma si dissolve in acido nitrico. Il Tellurio è spesso usato come additivo per l'acciaio ed è spesso unito in leghe con Alluminio, Rame, Piombo o Stagno. Il Tellurio è aggiunto al piombo per migliorare la sua durevolezza, forza e resistenza alla corrosione. Può essere usato per gettate di ferro, ceramica, protezioni, pannelli solari, vetri di calcogenide. È tossico per gli organismi acquatici e la fauna selvatica in generale e può arrivare fino all'uomo attraverso la catena alimentare.

**Classificazione secondo il Regolamento CE n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS**

<b><i>FINE VITA PANNELLI</i></b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Tellurio (Te)</b>	Bassa tossicità ambientale	Sonnolenza Mal di testa Nausea Dolori addominali Vomito	Può essere assorbito soprattutto per inalazione

<sup>58</sup> <https://www.lenntech.it/periodica/elementi/te.htm#ixzz653ffYeFA>

<sup>59</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.028.678>

## Tellururo di Cadmio (CdTe)<sup>60,61</sup>

Il Tellururo di cadmio (CdTe) è un composto chimico cristallino e stabile formato da Cadmio e Tellurio. In considerazione del fatto che si tratta di un **semi-conduttore**, il Tellururo di cadmio è utilizzato, per lo più, per la produzione di **celle solari**. Ha, infatti, caratteristiche simili all'Arseniuro di gallio (un altro semi-conduttore inorganico) e al silicio (l'elemento chimico alla base del cosiddetto fotovoltaico di prima generazione), ma con costi decisamente ridotti (Cadmio e Tellurio sono, infatti, considerati materiali di scarto, derivanti dall'estrazione di minerali non ferrosi e la quantità di materiale utilizzato è 100 volte inferiore). Il Tellururo di cadmio, opportunamente trattato, si rivela particolarmente stabile, durante l'arco di alcuni decenni. Il composto ha una solubilità minore di altri composti del Cadmio, non rilascia facilmente la forma ionica del Cadmio e ha in generale una tossicità minore degli elementi che lo compongono considerati singolarmente. Il tempo di ritorno energetico è, inoltre, più breve rispetto a quello di altre tecnologie fotovoltaiche.

### Classificazione secondo il Regolamento CE n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS

<b>FINE VITA PANNELLI</b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Tellururo di cadmio (CdTe)</b>	Molto tossico per gli organismi acquatici con effetti di lunga durata.	Danni ai polmoni a seguito di inalazione Cancro ai polmoni e ai reni	

## Titanio (Ti)<sup>62,63</sup>

Il comportamento chimico del Titanio mostra molte somiglianze con quello del silicio e dello zirconio. Il Diossido di titanio è estesamente usato come pigmento bianco nelle pitture esterne, dal momento che è chimicamente inerte, per il suo elevato potere coprente, la sua opacità ai danni provocati da luce UV e la sua capacità autopulente.

Il Titanio non svolge nessun ruolo biologico noto. L'agenzia internazionale per ricerca sul cancro (IARC) ha collocato il diossido di titanio all'interno del gruppo 3 (l'agente non è classificabile quanto la sua carcinogenicità per gli esseri umani.)

### Classificazione secondo il Regolamento CE n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS

<b>FINE VITA PANNELLI</b>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Titanio (Ti)</b>	Bassa tossicità	Bassa tossicità	

<sup>60</sup> <http://www.fotovoltaicosulweb.it/guida/celle-solari-al-tellururo-di-cadmio.html>

<sup>61</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.028.678>

<sup>62</sup> <https://www.lennotech.it/periodica/elementi/ti.htm#ixzz65EvenpfX>

<sup>63</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.028.311>

## Zinco (Zn)<sup>64,65</sup>

È usato principalmente per la galvanizzazione del ferro. Più del 50% di Zinco metallico finisce nella galvanizzazione dell'acciaio, ma è anche importante nella preparazione di determinate leghe, per esempio metallo antifrizione, ottone, argento tedesco e a volte bronzo. È usato per le piastre negative in determinate batterie elettriche e per la costruzione di tetti e grondaie di edifici.

Sui terreni ricchi di Zinco soltanto un numero limitato di piante può sopravvivere. A causa degli effetti sulle piante, lo Zinco costituisce una seria minaccia alle produzioni agricole.

Lo Zinco può interrompere l'attività del terreno, poiché influenza negativamente l'attività dei microrganismi e dei vermi da terra. Livelli molto elevati di Zinco possono causare danni a pancreas e disturbare il metabolismo delle proteine e causano arteriosclerosi. Una lunga esposizione a Cloruro di zinco può causare disordini respiratori.

### Classificazione secondo il Regolamento CE n. 1272/2008 (CLP) - Normativa RoHS

<i>FINE VITA PANNELLI</i>			
	<b>Ambiente</b>	<b>Salute (Effetti acuti e cronici)</b>	<b>Note</b>
<b>Zinco (Zn)</b>	Tossico per flora e fauna del suolo e degli ambienti acquatici	Bassa tossicità	Assorbimento soprattutto per inalazione

## EVA (Etilene Vinil Acetato)<sup>66</sup>

Un discorso a parte va fatto per l'EVA (l'Etil-Vinil-Acetano -  $(C_2H_4)_n(C_4H_6O_2)_m$ ) che entra nella fabbricazione della maggior parte dei pannelli fotovoltaici. Si tratta di una materia plastica copolimerica composta da Etilene e Acetato di Vinile. Viene utilizzata soprattutto per le sue caratteristiche di flessibilità e elasticità, che ne fa un ottimo sigillante e impedisce la proliferazione di funghi e batteri che danneggerebbero i pannelli fotovoltaici, riducendone sensibilmente la durata. L'EVA rappresenta un elemento critico del processo di trattamento di fine vita dei pannelli fotovoltaici (Malandrino *et al*, 2017), in quanto: la rimozione del film di EVA dai frammenti dei pannelli rappresenta un processo termico ad elevato consumo energetico; Una parte del trattamento prevede l'utilizzo di solventi; è necessario sottoporre a trattamento i fumi di processo.

<sup>64</sup> <https://www.lenntech.it/periodica/elementi/zn.htm#ixzz65EwbiEya>

<sup>65</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.028.341>

<sup>66</sup> <https://echa.europa.eu/it/substance-information/-/substanceinfo/100.003.224>

## Processi di riciclaggio dei pannelli fotovoltaici

Abbiamo visto che i tipi di pannelli fotovoltaici attualmente in produzione e in attività sono abbastanza numerosi. I più comuni, tuttavia, sono quelli di prima e seconda generazione. Queste tipologie di pannelli sono anche quelle che arriveranno prima a fine vita, e per le quali si dovrà provvedere alla dismissione attraverso idonei processi di riciclaggio/riuso.

I processi di riciclo/riuso dei pannelli fotovoltaici, come qualsiasi altro processo industriale, possono potenzialmente generare impatti sull'ambiente e sulla salute, sulla base sia del tipo di processo utilizzato che dei materiali trattati.

I processi di riciclaggio possono essere di bassa o di alta qualità, a seconda se prevedono un parziale o un quasi totale recupero delle materie trattate.

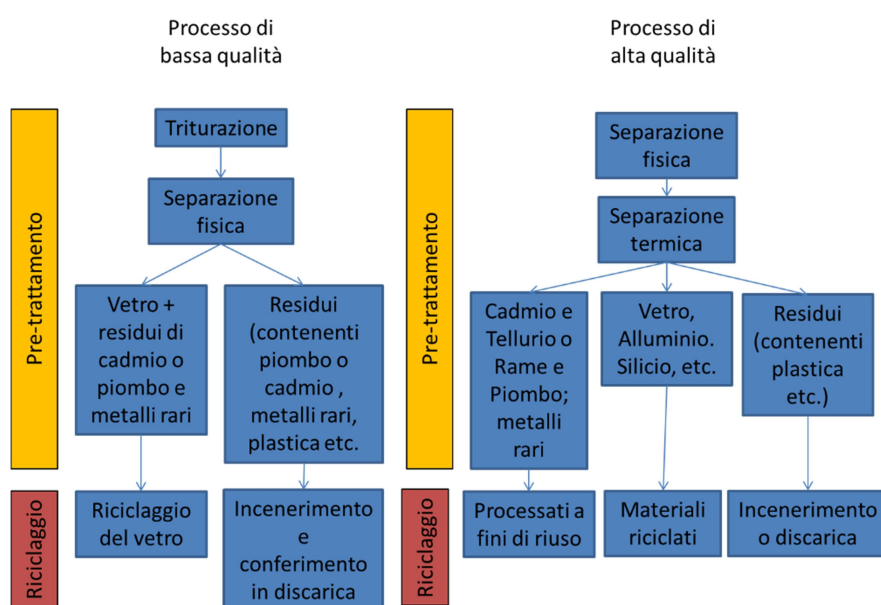


Figura 2: Processi di riciclaggio di bassa e di alta qualità (Marchioro S., 2012).

I processi di bassa qualità sono quelli che, oltre a perdere la possibilità di riutilizzare materiali a volte di pregio, prevedono un maggiore inquinamento ambientale a causa:

- del potenziale rilascio nell'ambiente di sostanze pericolose o inquinanti;
- della produzione di un quantitativo anche molto consistente di rifiuti da smaltire in discarica.

Müller *et al.* (2005) si sono occupati di descrivere le problematiche legate al fine vita dei pannelli al silicio cristallino. Essi affermano che questa tipologia di moduli sono costituiti da una percentuale di materiali non smaltibili tal quale in discarica (nello specifico si tratta di materiale organico), per un ammontare superiore al 3%, quindi, come da legislazione in merito allo smaltimento, non possono essere conferiti in discarica senza un pre-trattamento (2003/33/CE)<sup>67</sup>. Un possibile metodo di pre-trattamento potrebbe essere quello di rimuovere la cornice di alluminio (avviata poi al riciclaggio) e conferire il restante materiale proveniente dai

<sup>67</sup> [https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/normativa/decisione\\_19dic2002\\_rifiuti\\_discariche.pdf](https://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/normativa/decisione_19dic2002_rifiuti_discariche.pdf)



pannelli ad un inceneritore, al fine di abbattere la frazione organica e poi smaltire in discarica come materiale inerte le ceneri così ottenute; un'altra possibilità è quella di procedere alla triturazione del materiale ottenuto dopo la rimozione della cornice di alluminio, avviare a riciclaggio la frazione vetrosa così ottenuta e avviare il resto all'inceneritore e quindi allo smaltimento in discarica. Sebbene questi processi siano certamente meno *energy demand* di un processo di riciclaggio e riuso, i vantaggi ambientali sono certamente inferiori rispetto a soluzioni di riciclaggio di alta qualità, che permettono anche un maggiore recupero di materiali scarsi/preziosi.

I processi a cui sono sottoposti i pannelli fotovoltaici a fine vita descritti in letteratura sono di numerosi tipi (Padoan *et al.*, 2019) e in molti casi un tipo di processo si alterna ad un altro, fino al recupero/trattamento completo dei pannelli. È possibile raggruppare le tipologie di trattamento in quattro grandi categorie:

- **Processi di tipo fisico:** si tratta sostanzialmente di trattamenti meccanici che provvedono alla frantumazione mediante schiacciamento o attrito, magari attraverso rotori a lama (*blade rotors*) o a martello (*hammer*). Ancora, per separare i componenti può essere utilizzata la flottazione o la sabbiatura sottovuoto.
- **Processi di tipo termico:** Un tipico processo termico è la delaminazione, che utilizza le alte temperature per decomporre l'EVA e facilitare la susseguente separazione meccanica tra il vetro e il silicio delle celle solari. Nei processi che utilizzano il calore si possono raggiungere temperature anche molto alte. Ci sono dei processi che dichiarano fino a 800°C (Gustafsson *et al.*, 2014) e tempi di esposizione prolungati, prevedendo quindi un consumo energetico notevole e non risultano, così, né economicamente, né ecologicamente sostenibili (Padoan *et al.*, 2019).
- **Processi di tipo chimico:** Alcuni processi di tipo chimico prevedono la dissoluzione dell'EVA per contatto con solventi organici (ad esempio il tricloroetilene  $C_2HCl_3$  utilizzato come solvente per 10 gg ad 80°). 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. I processi di tipo chimico, tuttavia, sono applicati soprattutto per il recupero di materie prime-secondarie di elevato valore economico, quali, ad esempio, l'argento contenuto nei pannelli fotovoltaici mediante l'utilizzo di  $HNO_3$ . Con questi metodi è possibile recuperare una percentuale molto alta dei metalli preziosi contenuti nei pannelli. Ad esempio Fthenakis e Wang (2006) hanno messo a punto un metodo dal costo molto contenuto (2 centesimi per W per un impianto di riciclaggio da 10 MW/anno) per il recupero del Cadmio e del Tellurio dai pannelli CdTe. Il processo proposto si basa sulla lisciviazione con acido solforico ( $H_2SO_4$ ) e perossido di idrogeno ( $H_2O_2$ ) a temperatura ambiente e la successiva separazione di Cd e Te con resina a scambio cationico, ottenendo una rimozione del cadmio superiore al 99,99% e del Tellurio del 90-96%.
- **Processi di tipo fisico-chimico combinato:** Con questi processi è possibile ottenere la dissoluzione dell'EVA combinando l'utilizzo di un solvente organico con 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 sempre di processi che richiedono un utilizzo energetico molto elevato.

FIRE, la Federazione Italiana per l'Uso Razionale dell'Energia ha pubblicato nel 2018 una Guida al fine vita degli impianti fotovoltaici<sup>68</sup> nel quale mette a confronto una serie di tecnologie utilizzate e le rese in termini di impatti ambientali evitati da ciascuna di esse.

Data la numerosità dei tipi di trattamento sperimentati (FIRE, 2018), nel prosieguo ci concentreremo sull'analisi di processi di riciclo che hanno dimostrato una fattibilità sia di tipo industriale che economica, almeno dal punto di vista teorico. Va infatti ricordato che la fattibilità economica dipende anche dalla disponibilità sul mercato di pannelli solari da trattare. Tale disponibilità andrà aumentando nel tempo, man mano che si arriverà al fine vita degli impianti.

La Comunità Europea si è mostrata molto sensibile agli aspetti legati al fine vita degli impianti fotovoltaici. Ha infatti finanziato diversi progetti volti a sperimentare tecnologie atte a riciclare i pannelli fotovoltaici a fine vita.

### **Il Progetto EU SENSE<sup>69</sup>**

Il Progetto EU SENSE (*Sustainability evaluation of solar energy systems*), coordinato dall'Università di Stoccarda e finanziato sotto gli auspici dell'FP5-EESD, cominciato nel 2003 e terminato nel 2006, ha analizzato il ciclo di vita (LCA) di tre differenti tipologie di celle solari, al fine di giungere alla conclusione sul tipo di vantaggio derivato da un corretto riciclaggio delle componenti. Le tipologie di pannelli analizzati sono stati quelli a silicio amorfo (a-Si), quelli a Seleniuro di rame-indio (CIS) e quelli a Tellururo di Cadmio (CdTe). Una caratteristica di grande interesse di questo progetto è stata quella di poter analizzare il ciclo di vita di queste tipologie di pannelli basandosi su dati reali di linee di produzione e non su simulazioni<sup>70</sup>.

Il consorzio ha sviluppato processi prototipali di riciclaggio per moduli solari a film sottile, processi che però richiedono altra sperimentazione per poter entrare nella fase di industrializzazione, dopo la fine del progetto. In realtà i processi meccanici tal quali non si sono dimostrati in grado di separare completamente i semiconduttori dai residui di vetro. Un processo che utilizzava getti d'acqua è risultato troppo costoso e inadatto a moduli di grandi dimensioni. I processi termici hanno raggiunto l'obiettivo di separare i semiconduttori dal resto, per temperature comprese tra i 450 e i 500°C (FIRE, 2018).

### **Il Progetto EU RESOLVED<sup>71</sup>**

Il progetto EU RESOLVED (*REcovery of SOLar Valuable materials, Enrichment and Decontamination*), coordinato dal Federal Institute for Materials Research and Testing di Berlino, negli anni 2004-2007, ha

---

<sup>68</sup> <http://fire-italia.org/associarsi/guida-al-fine-vita-degli-impianti-fotovoltaici/>

<sup>69</sup> <https://cordis.europa.eu/project/id/ENK5-CT-2002-00639>

<sup>70</sup> <https://cordis.europa.eu/article/id/84253-bringing-recycling-to-the-solar-cell-industry/it>

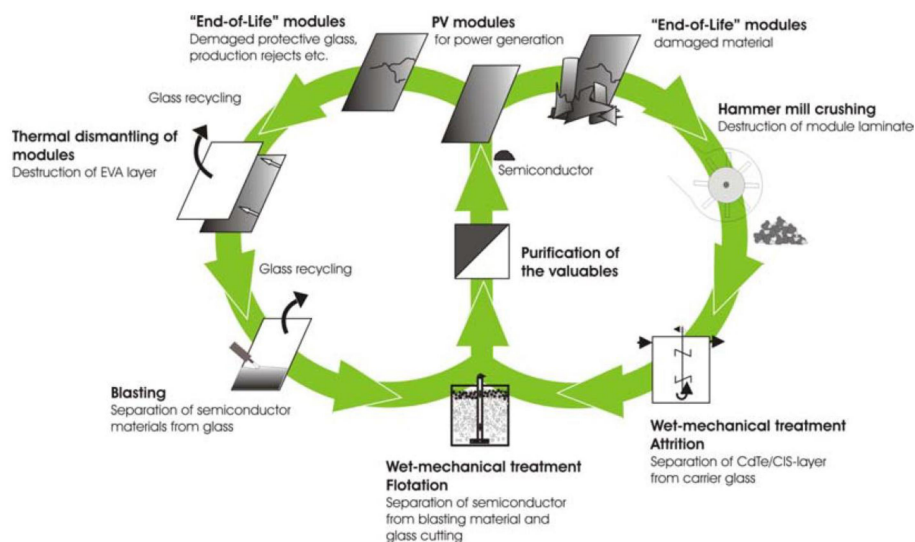
<sup>71</sup> [http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n\\_proj\\_id=2703&docType=pdf](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=2703&docType=pdf)

preso in considerazione proprio la necessità che i processi di riciclaggio dei pannelli fotovoltaici a fine vita tenessero in debito conto il trattamento delle sostanze pericolose, tossiche e nocive in essi contenute, identificando e testando metodi alternativi per ridurre l'utilizzo di sostanze chimiche nel riciclaggio dei moduli a film sottile e recuperare il più possibile le risorse utilizzabili in nuovi cicli industriali.

Il Progetto Resolved ha testato a livello di laboratorio la fattibilità del riciclaggio dei moduli a film sottile mediante un processo meccanico di sfregamento tra le diverse superfici, sia per moduli CIS che CdTe, e una successiva fase di lavorazione in ambiente umido e di flottazione.

Le conclusioni dell'analisi del ciclo di vita hanno dimostrato che l'innovativa strategia di riciclaggio presenta chiari vantaggi ambientali rispetto alle opzioni di riempimento del terreno o di incenerimento, nonché rispetto ad altri tipi di riciclaggio che prevedono un trattamento termico ad elevato consumo di energia.

Il trattamento meccanico ad umido, con utilizzo minimo di composti chimici, consiste in un ciclo chiuso a due vie (Fig. 3), una delle quali utilizzabile per il trattamento di moduli sia integri che danneggiati, e l'altra per i moduli danneggiati e gli scarti di produzione.



**Figura 3:** Strategia di riciclaggio a ciclo chiuso per i moduli a film sottile messa a punto nel progetto Resolved (da: Petrangolo, 2011)

Le fasi di processo sono così descritte:

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.

Recupero dei materiali di alto valore (*Vacuum Blasting*): la lastra di vetro rivestita dagli strati di materiale semiconduttore viene sottoposta ad un particolare **processo di sabbiatura**, che rimuove lo strato di semiconduttore e gli altri strati metallici presenti sulla superficie vetrosa.

Il vetro ripulito viene inviato ai sistemi di riciclaggio 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.

Nel secondo percorso, utilizzato sia per moduli intatti che danneggiati, 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, i quali hanno la propria 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 riciclaggio.

Vi sono poi due fasi, comuni ad entrambi i cicli, nelle quali si provvede all'aumento di concentrazione e alla separazione dei materiali.

**Flottazione** (*Wet-Mechanical Treatment Flotation*): la flottazione è un processo meccanico ad umido che consente la separazione di particelle da una miscela. Nel caso in oggetto serve per ottenere un concentrato di materiale semiconduttore da avviare poi alla purificazione finale. La schiuma così ottenuta, ricca dei materiali di maggior valore, viene poi **purificata per via idrometallurgica** (*Purification of the valuables*) attraverso un processo di lisciviazione che utilizza composti acidi, fino a raggiungere materiali fotoattivi con un grado di purezza (99,999%) necessario per un utilizzo come materia prima seconda in nuove applicazioni fotovoltaiche. Le particelle fini di vetro, invece, si depositano sul fondo durante la fase di flottazione e vengono avviate al comune riciclaggio dei residui vetrosi.

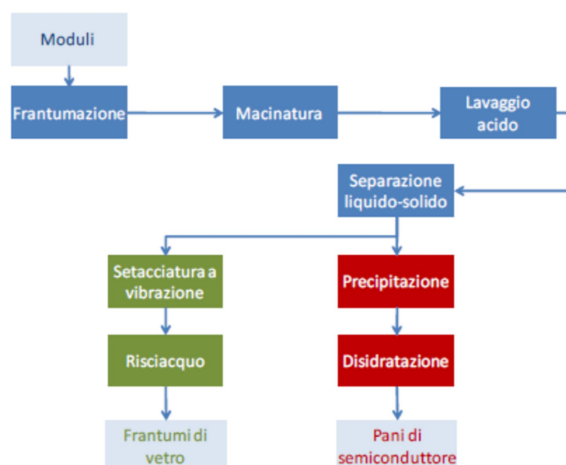
Di seguito cerchiamo di evidenziare gli impatti ambientali potenzialmente derivanti dalle diverse fasi relative al processo di riciclaggio dei pannelli messo a punto nell'ambito del progetto RESOLVED. Gli impatti potenziali sono quelli che possono derivare da eventuali incidenti industriali, o da una cattiva gestione delle fasi del processo industriale.

Fase di Processo	Eventuale possibile impatto ambientale
<b>I Percorso</b>	
<b>Trattamento termico</b> (450-500 °C). Distruzione dello strato di EVA e separazione delle lastre di vetro	Possibile emissione di fumi, altamente inquinanti, da trattare in un post-combustore. Da verificare la presenza di processi di abbattimento di questi fumi e sulle modalità di smaltimento degli eventuali filtri. Anche i filtri, infatti, se non correttamente smaltiti, possono essere inquinanti
<b>Processo di sabbiatura</b> ( <i>Vacuum blasting</i> ) per il recupero dei materiali semiconduttori	Possibile emissione di polveri di silicio e altri contaminanti
<b>II Percorso</b>	
<b>Processo di frantumazione</b>	Possibile emissione di polveri di silicio e altri contaminanti

( <i>Crusching</i> ) mediante un mulino a martelli	
<b>Trattamento meccanico ad umido</b> ( <i>Wet-Mechanical Treatment Attrition</i> ): miscelazione ad alta energia	Possibile dispersione in ambiente di acqua contaminata da metalli
<b>Fasi comuni</b>	
<b>Processo meccanico ad umido</b> (flottazione): ottenimento di un preconcentrato ricco di materiali di valore (Cadmio, Tellurio, etc.)	Possibile dispersione in ambiente di acqua contaminata da metalli. Da verificare la presenza di un eventuale processo di purificazione del residuo liquido.
<b>Purificazione finale</b> ( <i>Purification of the valuables</i> ) mediante utilizzo di composti acidi	Possibile emissione di composti acidi

Attualmente i processi di riciclaggio più descritti (e ritenuti anche più efficienti) sono quelli messi a punto dalla Deutsche Solar in Germania per i moduli al Silicio cristallino, e dalla statunitense First Solar per i moduli al CdTe. Nel presente lavoro si analizza più nello specifico i processi di trattamento della First Solar e della Deutsche Solar, per verificare se è possibile identificare in essi passaggi potenzialmente impattanti dal punto di vista ambientale e della salute. Va chiarito che non esiste differenza nei processi di trattamento di pannelli fotovoltaici a fine vita rispetto ai pannelli dismessi perché non funzionanti o danneggiati.

## Il processo First Solar



**Figura 4:** Processo First Solar (da: Fire, 2018)

Il processo della **First Solar** per il riciclaggio dei pannelli al Tellururo di Cadmio (CdTe) è stato sviluppato dall'azienda statunitense per prevenire eventuali problemi ambientali legati allo smaltimento del Cadmio contenuto nei pannelli di sua produzione (Padoan, 2019).

Il processo si compone di varie fasi. Di seguito cerchiamo di evidenziare gli impatti ambientali potenzialmente derivanti dalle diverse fasi relative al processo di riciclaggio dei pannelli messo a punto dalla First Solar. Gli impatti potenziali sono quelli che possono derivare da eventuali incidenti industriali o da una cattiva gestione delle fasi del processo industriale.

Fase di Processo	Eventuale possibile impatto ambientale
<p><b>Ritiro:</b> su richiesta del cliente, First Solar fornisce i materiali di imballaggio appropriati e effettua il ritiro dei moduli da smaltire. Una volta giunti nello stabilimento di riciclaggio ai moduli viene tolta manualmente la cornice in alluminio per poi essere avviati alle fasi successive;</p>	<p>Impatto ambientale da emissioni legate al trasporto veicolare</p>
<p><b>Riduzione dimensionale:</b> le dimensioni dei moduli vengono ridotte mediante un processo a due stadi.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nel primo stadio si utilizza una <b>frantumatrice</b> per ridurre i pannelli in pezzi piuttosto grossolani, i quali vengono poi inviati mediante un convogliatore chiuso alla fase successiva.</li> <li>- Nel secondo stadio un <b>mulino a martelli</b> frantuma ulteriormente la componente vetrosa, che rappresenta la frazione principale dei frammenti dei moduli ottenuti. Le lastre di vetro infatti devono essere ridotte in <b>schegge di piccole dimensioni (circa 4/5 mm)</b>, in modo da garantire la rottura del legame creato dalla procedura di laminazione. I pezzi di modulo vengono poi inviati, mediante un <b>convogliatore coperto</b>, allo stadio successivo del riciclaggio. Al fine di controllare la formazione e le emissioni di polveri dannose, in tutte le fasi del processo che non comportano l'utilizzo di sostanze liquide (come in questa fase) è previsto l'impiego di un <b>sistema di aspirazione dotato di un filtro antiparticolato ad elevata efficienza (HEPA)</b>, che consente di rimuovere dall'aria le particelle solide presenti in sospensione;</li> </ul>	<p>Possibile emissione di polveri di silicio e altri contaminanti</p>
<p><b>Rimozione del film semiconduttore:</b> i frammenti così ottenuti vengono inseriti per circa 4/6 ore in un <b>tamburo di acciaio inossidabile a rotazione lenta</b>, a cui viene aggiunto <b>dell'acido solforico diluito e del perossido di idrogeno</b> fino a quando non si ottiene un rapporto solido-liquido ottimale. Ha luogo in questa maniera un <b>processo di lisciviazione (leaching)</b> che permette di rimuovere il film semiconduttore mediante un attacco chimico;</p>	<p>Possibili emissioni di acido solforico e perossido di idrogeno (D. Lgs. n.152/2006 – Parte IV – Allegato H – C23)</p> <p>L'acido solforico è un acido minerale forte, liquido a temperatura ambiente, oleoso, incolore e inodore; la sua formula chimica è <math>H_2SO_4</math></p> <p>Il perossido di idrogeno, noto anche come acqua ossigenata, è il più semplice dei perossidi. La sua formula chimica è <math>H_2O_2</math>.</p>
<p><b>Separazione solido-liquido:</b> il contenuto del tamburo viene versato lentamente in un dispositivo separatore per procedere alla separazione delle parti in vetro da quelle liquide. La frazione solida, composta per lo più da frammenti di vetro e pezzi di EVA, viene trasportata lungo un piano inclinato da una vite rotante. I liquidi, invece, rimangono sul</p>	<p>Possibile dispersione in ambiente di acqua contaminata dalle sostanze liscivianti del processo precedente.</p>

fondo del separatore per poi essere drenati verso l'unità di precipitazione.	
--	--

A questo punto il processo si divide in due percorsi differenti: uno per la frazione solida e l'altro per la frazione liquida ad elevato contenuto di metalli.

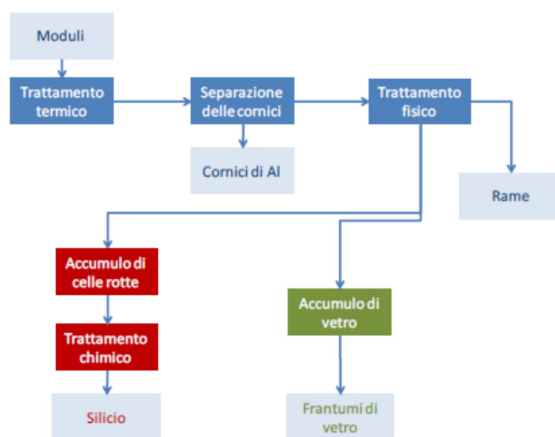
<b>Frazione solida:</b>	
<b>Separazione del vetro dall'EVA:</b> il materiale vetroso viene separato dall'incapsulante (EVA) mediante un <b>setaccio industriale</b> . I pezzi di EVA, essendo di maggiori dimensioni, si muovono lungo la parte superiore grazie ad un'azione vibrante e si raccolgono su di un piccolo convogliatore attraverso il quale sono poi fatti uscire. La frazione vetrosa invece, avendo dimensioni più piccole, non riesce ad attraversare la sezione vagliante e così cade verso il basso attraverso le maglie del setaccio. In questo modo è quindi possibile separare le due frazioni solide e il vetro può essere inviato alla fase successiva di risciacquo.	Possibile emissione di polveri di silicio
<b>Risciacquo:</b> Il vetro viene depositato su di un nastro trasportatore strettamente intrecciato che avanza lentamente. Nel frattempo il materiale è sottoposto a risciacquatura. L'acqua impiegata per il lavaggio rimuove dal vetro gli eventuali residui di film semiconduttore e poi fuoriesce dalla parte inferiore del nastro: in questa maniera il vetro ripulito viene imballato e inviato al riciclaggio, mentre l'acqua di risciacquo viene pompata verso il sistema di precipitazione per il recupero dei metalli;	Possibile dispersione in ambiente di acqua contaminata da metalli. Viene avviata al trattamento della frazione liquida (D. Lgs. n.152/2006 – Parte IV – Allegato H – C6 – C18)
<b>Frazione liquida:</b>	
<b>Precipitazione:</b> i liquidi con un elevato contenuto di metalli, provenienti dalla fase della separazione solido-liquida e della risciacquatura del vetro, sono pompati nel <b>dispositivo di precipitazione</b> . I composti metallici vengono così sottoposti ad un processo di precipitazione articolato in tre fasi <b>con valori di pH crescenti</b> ;	Possibili dispersioni in ambiente delle sostanze (acidi e basi) utilizzate per la precipitazione e del precipitato, ad elevato contenuto di Cadmio e Tellurio (D. Lgs. n.152/2006 – Parte IV – Allegato H – C23 – C24).
<b>Idroestrazione:</b> i materiali precipitati vengono concentrati in una vasca di ispessimento dove i solidi vengono fatti depositare sul fondo, mentre l'acqua chiarificata viene pompata via. Il materiale ispessito viene in seguito pompato verso una <b>filtrpressa</b> che consente di eliminare l'acqua in eccesso. L'agglomerato filtrato risultante, che presenta un elevato contenuto metallico (Cadmio e Tellurio), viene imballato e inviato ad un fornitore esterno per essere raffinato e utilizzato per la produzione del materiale semiconduttore da impiegare nella costruzione di nuovi moduli.	Possibili dispersioni in ambiente delle sostanze (acidi e basi) utilizzate per la precipitazione e del precipitato, ad elevato contenuto di Cadmio e Tellurio (D. Lgs. n.152/2006 – Parte IV – Allegato H – C23 – C24).

Una volta imballato, l'agglomerato non è più da considerarsi pericoloso. A questo stadio del trattamento Cadmio e Tellurio escono dal processo. Il trasporto verso il fornitore esterno è considerato parte del nuovo processo industriale a cui viene destinato. Eventuali altri impatti ambientali, in un'ottica di LCA, saranno da addebitare alla nuova fase produttiva. Il processo è fortemente standardizzato ed è stato replicato in tutti gli stabilimenti First Solar, compreso quello di Frankfurt Oder in Germania, che ad oggi gestisce gli scarti industriali e i pannelli che raggiungono una fine di vita prematura installati in Europa. Mediante questo processo, è possibile recuperare il 90% del vetro, utilizzabile per nuovi prodotti, e il 95% del materiale semiconduttore per l'utilizzo in nuovi pannelli (FIRE, 2018).

È da considerare che l'approccio chimico proposto nel processo First Solar (ma anche in processi industriali messi a punto da altri soggetti) non sarebbe altrettanto efficace se non fosse previsto anche un pre-trattamento meccanico che aumenta la superficie di contatto del pannello con gli agenti chimici. Sia il pre-trattamento meccanico che l'attacco con gli agenti chimici sono processi particolarmente sensibili alle emissioni di particolato, di gas e liquidi tossici, che richiedono misure di controllo di tali emissioni (IEA-PVPS, 2018).

## Il processo Deutsche Solar

La Deutsche Solar è una compagnia industriale affiliata al gruppo SolarWorld, il cui obiettivo industriale è focalizzato principalmente sul recupero del silicio, proveniente sia dai pannelli fotovoltaici a fine vita che dai pannelli danneggiati.



**Figura 5:** Processo Deutsche Solar (da: Fire, 2018)

Il processo è 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.

Di seguito cerchiamo di evidenziare gli impatti ambientali potenzialmente derivanti dalle diverse fasi relative al processo di riciclaggio dei pannelli messo a punto dalla Deutsche Solar. Gli impatti potenziali sono quelli che possono derivare da eventuali incidenti industriali o da una cattiva gestione delle fasi del processo industriale.



Fase di Processo	Eventuale possibile impatto ambientale
<b>Trattamento termico</b>	
<p>i moduli vengono messi in un <b>forno di incenerimento</b> dove i componenti plastici (EVA e il foglio polimerico di Tedlar) bruciano a una temperatura di 550/600 °C.</p> <p>In questa fase viene liberato acido acetico (CH<sub>3</sub>COOH)<sup>72</sup>. Il materiale incapsulante, dunque, si decompone insieme alle altre sostanze polimeriche e la struttura a "sandwich" si separa nei suoi componenti.</p> <p><b>I gas generati dalla combustione (contenenti composti organici derivanti dalla decomposizione dei materiali polimerici – sostanzialmente l'EVA ma anche altre sostanze) vengono trattati in un post-combustore e successivamente purificati mediante un sistema di abbattimento delle sostanze inquinanti.</b></p> <p>Questa fase prevede uso di energia e di acqua per il lavaggio. Gli output di questa parte di processo sono sostanzialmente vetro, metalli, <b>acque reflue e emissioni in atmosfera.</b></p>	<p>I fumi, altamente inquinanti, vengono trattati in un post-combustore per abbattere le sostanze inquinanti contenute. Bisognerebbe cercare notizie sul grado di abbattimento di questi fumi e sulle modalità di smaltimento dei filtri. Anche i filtri, infatti, se non correttamente smaltiti, possono essere altamente inquinanti (D. Lgs. n.152/2006 – Parte IV – Allegato B).</p> <p>Anche le acque di lavaggio possono essere ricche di sostanze altamente inquinanti. Devono, allora, essere previsti seri metodi di trattamento e smaltimento delle acque reflue.</p>

Dopo il disassemblaggio, la cornice di alluminio, il vetro e le celle vengono separati manualmente. I primi due vengono inviati al riciclaggio e integrati nei rispettivi cicli dei materiali; le celle di silicio, invece, vengono trattate mediante un processo chimico.

Fase di Processo	Eventuale possibile impatto ambientale
<b>Processo chimico</b>	
<p>Consiste nel recuperare le fette di silicio rimuovendo dalle celle fotovoltaiche, in modo sequenziale e selettivo, gli strati di materiali che rivestono il wafer (lo strato di metallizzazione superiore e anteriore, lo strato di rivestimento antiriflettente, nonché la giunzione p-n<sup>73</sup>). Tali operazioni si effettuano con una serie di bagni e attacchi chimici (etching) che utilizzano diversi composti (acido fluoridrico, acido nitrico (HNO<sub>3</sub>), acido acetico, perossido di idrogeno, acqua distillata, etc<sup>74</sup>.) i quali aggrediscono la</p>	<p>Tutti gli acidi qui indicati possono essere altamente inquinanti se liberati, anche accidentalmente, in ambiente e pericolosi per la salute (D. Lgs. n.152/2006 – Parte IV – Allegato H – C23 – C24);</p> <p>Le fasi di etching, quindi, devono essere attentamente pianificate e condotte con i dovuti accorgimenti di sicurezza ambientale e di sicurezza sul lavoro.</p>

<sup>72</sup> Jung *et al.*, 2016.

<sup>73</sup> Con il termine **giunzione p-n** si indica l'interfaccia che separa le parti di un semiconduttore sottoposte a drogaggio di tipo differente.

<sup>74</sup> Bombach *et al.* (2005) riferisce anche l'uso di acido solforico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

superficie della cella fino a liberare totalmente la base di silicio, cioè il wafer, che può poi essere riutilizzato per la costruzione di una nuova cella solare.	
--	--

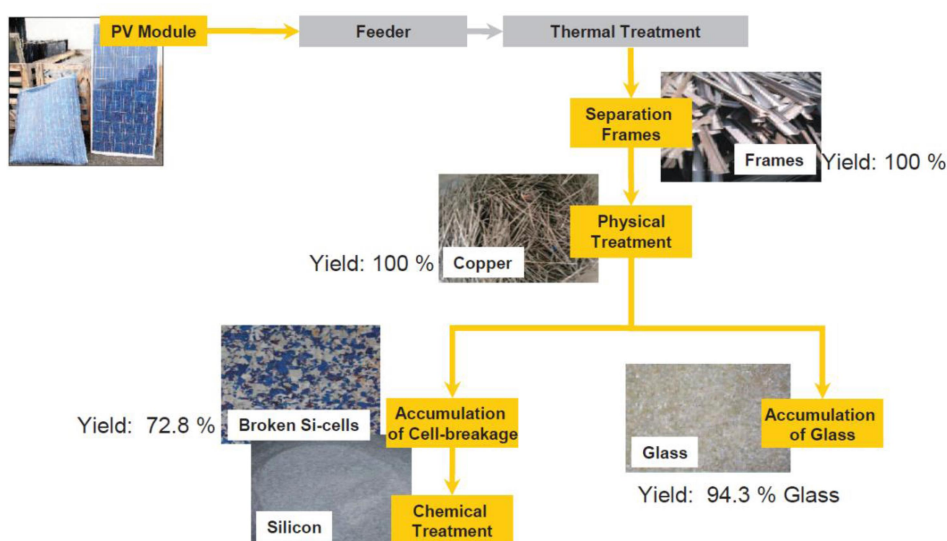
Questo processo chimico dà come risultato un **fango ricco di sostanze chimiche** che viene poi smaltito, mentre l'**acqua utilizzata viene trattata presso impianti di purificazione**. A causa delle sostanze chimiche presenti sia nei fanghi derivati dal trattamento che nelle acque utilizzate per il risciacquo, sarebbe necessario analizzare più nel dettaglio i processi di smaltimento dei primi e di trattamento delle seconde, per evidenziare i potenziali impatti sia sull'ambiente che sulla salute di questa fase industriale.

C'è da dire che questa fase, chiave per la separazione dei diversi materiali e il recupero del wafer, non è uguale in ogni processo, ma varia a seconda dei produttori che la applicano.

In termini di resa, Deutsche Solar dichiara che il semiconduttore viene riciclato al 73%, di cui 59% con grado di purezza sei-9 (99,9999%), il restante 41% con grado di purezza quattro-9. Il vetro viene riciclato al 94%, idoneo a un suo riutilizzo per produrre vetro float. In generale il 95,7% del modulo viene riciclato (FIRE, 2018). Padoan (2019) afferma, tuttavia, che il processo della Deutsche Solar necessita di un elevato consumo energetico. Le rese in termini di LCA, quindi, devono essere attentamente considerate.

## Il processo Sunicon

Nel processo messo a punto dalla Sunicon (Associata SolarWorld, stesso gruppo della Deutsche Solar), i moduli fotovoltaici vengono avviati ad un **trattamento termico** mediante un sistema automatico di alimentazione (**feeder**). La successiva fase di separazione meccanica permette di recuperare le parti in alluminio. Date le loro dimensioni infatti, questi componenti possono essere rimossi e recuperati completamente.



**Figura 6:** Schema del processo di riciclaggio di moduli fotovoltaici al silicio cristallino della Sunicon (da: Wambach, 2010)

Di seguito cerchiamo di evidenziare gli impatti ambientali potenzialmente derivanti dalle diverse fasi relative al processo di riciclaggio dei pannelli messo a punto nell'ambito del processo di trattamento messo a punto dalla SUNICON. Gli impatti potenziali sono quelli che possono derivare da eventuali incidenti industriali o da una cattiva gestione delle fasi del processo industriale.

Fase di Processo	Eventuale possibile impatto ambientale
<b>Trattamento termico</b>	
Durante questo stadio ha luogo la decomposizione dei materiali organici presenti, quelli che servono principalmente a mantenere uniti i diversi strati del pannello.	Il trattamento termico genera senza dubbio fumi potenzialmente inquinanti, ricchi dei residui di decomposizione dei materiali organici che rivestono i moduli. Sarebbe necessario approfondire che tipo di trattamento è previsto per questi fumi, la presenza di eventuali filtri e le modalità di loro smaltimento.
<b>Separazione meccanica</b>	
Le bandelle di rame e i segmenti che formano la cornice di alluminio vengono separati meccanicamente dal resto dei materiali	Possibili emissioni di polveri sottili
<b>Trattamenti fisici</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Frantumazione</li> <li>- Separazione gravitazionale per densità</li> </ul>	Possibile emissione di polveri di silicio. È necessario prevedere l'applicazione di un filtro anti-particolato
<b>Trattamento chimico</b>	
Utilizzo di sostanze chimiche atte a eliminare i vari rivestimenti e recuperare il silicio	Possibili dispersioni in ambiente delle sostanze (acidi e basi) utilizzate per il trattamento chimico (D. Lgs. n.152/2006 – Parte IV – Allegato H – C23 – C24).

Successivamente una serie di **trattamenti fisici (frantumazione, separazione gravitazionale per densità, etc.)** consente di rimuovere i materiali indesiderati e di separare il vetro (rendimento di recupero del 94,3%) dai frammenti delle celle solari rotte, le quali saranno sottoposte ad un successivo **trattamento chimico** necessario a recuperare il silicio.

La frazione vetrosa recuperata avrebbe una purezza del 99,99975%, il 59% del silicio avrebbe un grado di purezza del 99,9999%, mentre il restante 41% sarebbe puro al 99,995%.

Le fonti del silicio secondario ottenuto dalla Sunicon non sono solo relative ai pannelli dismessi a fine vita, ma anche scarti di produzione dell'industria solare e dei semiconduttori e moduli danneggiati durante le fasi di trasporto e montaggio.

Sunicon afferma di poter arrivare a trattare fino a 20000 t/anno di rifiuti fotovoltaici (pari ad un quantitativo che oscilla tra i 250 e i 286 MW, secondo quanto riferito da Tamaro *et al.*, 2016), ottenendo una percentuale di recupero complessivo in massa pari al 95,7% del trattato. Solo il 4,3% in peso del trattato, corrispondente alla somma delle frazioni finissime e di quelle indesiderate, non verrebbe recuperato (Wambach, 2010). Sarebbe necessario approfondire i contenuti in metalli di questa frazione di risulta e i relativi metodi di smaltimento.

## Problematiche energetiche e di emissione collegate ai processi di riciclaggio dei pannelli fotovoltaici

Il Ministero dell'Ambiente del Canada (Environment Canada, 2012) ha pubblicato nel 2010 un rapporto sulle performance ambientali delle tecnologie relative al solare fotovoltaico, prendendo in considerazione anche gli aspetti legati al consumo energetico e alle emissioni, in comparazione con altri tipi di impianti di produzione energetica. Ne conclude, come si vede dalla tabella seguente, che il fotovoltaico (tecnologia a Tellururo di Cadmio) è molto meno impattante dal punto di vista di emissioni di CO<sub>2</sub>eq rispetto alle altre principali tecnologie energetiche, mentre per quanto riguarda le emissioni di altri inquinanti atmosferici è meno inquinante del Carbone e del gas naturale, ma non dell'energia nucleare. Da questi computi sono però sempre escluse le fasi di dismissione e sono considerate solo quelle di estrazione-costruzione e esercizio. Mancano quindi, in questo caso, per una seria valutazione di LCA i dati relativi all'installazione e al fine vita.

Pollutants	CO <sub>2</sub> eq, t/TW h			
	Nuclear	Coal	Natural Gas	PV*
GHG emissions	1 836.74	1 051 215.33	540 391.16	18 000–28 000

**Tabella 7:** Emissioni di GHG (CO<sub>2</sub> eq, t/TWh) da differenti fonti energetiche in Ontario (Canada) (da: Environment Canada, 2012). I dati non prendono in considerazione il periodo di fine vita.

Pollutants	t/TW h			
	Nuclear	Coal	Natural Gas	CdTe PV*
Total air pollutants	12.42	6712.78	1452.63	NA
Nitrogen oxides	2.45	1676.58	720.12	75–85
Sulphur dioxide	8.54	3907.36	363.32	150–175
Carbon monoxide	0.00	418.11	274.47	NA
Total particulates	0.61	685.68	20.91	NA
<i>Volatile organic compounds</i>	0.81	25.05	73.81	NA

**Tabella 8:** Emissione di inquinanti (t/TWh) da differenti fonti energetiche in Ontario (Canada) durante il ciclo di vita (da: Environment Canada, 2012). I dati non prendono in considerazione il periodo di fine vita.

Sica *et al.* (2018) hanno calcolato la richiesta energetica (MJ/m<sup>2</sup>) e il tasso di emissione di Gas effetto serra (GHG – g CO<sub>2</sub> eq/kWh) associati al ciclo di vita nel suo insieme delle diverse tipologie di pannelli fotovoltaici (Tab. 9).

	Mono-Si (range)	Multi- Si (range)	Film sottile		
			a-Si	CdTe	CIGS/CIS
Richiesta energetica nel ciclo di vita (MJ/m <sup>2</sup> )	2860-5253	2699-5150	710-1990	790-1803	1069-1684
EPBT <sup>75</sup> (anni)	1,7-2,7	1,5-2,6	1,8-3,5	0,75-2,1	1,45-2,2
GHG emission rate (g CO <sub>2</sub> eq/kWh)	29-45	23-44	18-50	14-35	10,5-46

**Tabella 9:** Richiesta energetica, EPBT e emissione di GHG di pannelli fotovoltaici di diverse tipologie (da: Sica *et al.*, 2018).

Sebbene ad ogni fase di vita dei pannelli fotovoltaici (estrazione dei materiali costituenti, loro lavorazione e assemblaggio per la realizzazione dei pannelli, montaggio, fase di esercizio, dismissione, riciclaggio) corrisponda un certo grado di emissioni e di consumo energetico con conseguente impatto ambientale, per le necessità del presente lavoro si prenderà in considerazione la sola fase relativa al fine vita.

### Un po' di conti sul fotovoltaico in Italia

Tammaro *et al.*, (2014) stimano che in Italia sia possibile ipotizzare una quantità di 70/80 t di rifiuti generati da MWp installato. Quindi, tenuto conto della durata media di vita di un impianto (generalmente 25 - 30 anni) e di quando i grandi impianti sono stati realizzati in Italia, è possibile ipotizzare che dal 2030 ci sarà un incremento sempre più drammatico di rifiuti provenienti dagli impianti fotovoltaici.

	2013	2020	2030	2040	2050
<b>Europa</b>	11395	33000	133000	4000000	9500000
<b>Italia</b>	1757	1000	5000	1000000	n.d.

**Tabella 10:** Stima delle tonnellate di rifiuti da pannelli fotovoltaici in Europa e in Italia (Malandrino, 2017; Malandrino & Sica, 2017)

Uno studio del servizio di Biointelligence dell'aprile 2011 ordinato dalla Commissione europea, ha analizzato l'impatto del decommissioning dei pannelli fotovoltaici installati in Europa secondo due differenti scenari (Policy option A e B), comparati ad uno scenario base A (Non pre-trattamento / non riciclaggio dei pannelli fotovoltaici) e ad uno scenario base B (riciclaggio semplice):

- Policy option A: inclusione dei soli pannelli fotovoltaici residenziali nella Direttiva RAEE
- Policy option B: inclusione di tutti i pannelli fotovoltaici nella Direttiva RAEE

<sup>75</sup> L'Energy Pay-Back Time (EPBT o EPT) viene definito come il tempo che il sistema FV impiega a generare l'equivalente ammontare di energia consumata durante l'intero ciclo di vita del sistema stesso, ovvero il tempo, espresso in anni, necessario a ripagare il debito energetico costituito dall'energia primaria spesa durante la fase di produzione dei vari componenti del sistema e le fasi successive di trasporto, installazione, vita utile e decommissionamento dell'impianto. L'indicatore di questa quantità di energia primaria è il CED, Cumulative Energy Demand. (Petrangelo, 2011).

Il riciclaggio semplice, considerato nello scenario di base B, non comporta una compensazione dei costi sostenuti per il riciclaggio mediante il riciclaggio dei materiali stessi; i ricavi del riciclaggio compensano invece ampiamente i costi della logistica e dei trattamenti previsti per il riciclaggio, quando si considera un riciclaggio ad alto rendimento nelle Policy option A e B, un riciclaggio, per intendersi, che preveda anche il recupero e il riutilizzo a fini industriali di metalli rari e materie prime seconde. Inoltre la potenziale creazione di nuovi posti di lavoro aumenta con la quantità di pannelli a fine vita e la qualità del riciclaggio applicato ai pannelli riciclati, generando un aumento generale del PIL.

Tenendo conto dei costi della raccolta dei pannelli a fine vita e del costo di un trattamento e un riciclaggio adeguati, sulla base delle conoscenze attuali, l'opzione strategica B (inclusione di tutti i pannelli fotovoltaici nella Direttiva RAEE) offre il vantaggio netto più elevato. Nel 2050, questi benefici netti ammonterebbero annualmente a 16,6 miliardi di euro rispetto allo scenario di base A, a 16,5 miliardi di euro rispetto allo scenario di base B e 1,67 miliardi di euro rispetto alla Policy option A. I benefici economici maggiori relativi alla Policy option B, derivano in larga misura dall'aumento delle risorse ottenute mediante il riciclaggio.

Anche i benefici netti della Policy option A risultano positivi (anche se in misura ridotta rispetto alla Policy option B) e nel 2050 ammonterebbero ogni anno a circa 14,9 miliardi di euro rispetto allo scenario di base A e a quasi 14,8 miliardi di euro rispetto allo scenario di base B.

L'inclusione dei pannelli fotovoltaici nella direttiva RAEE genererà benefici non solo economici ma anche ambientali, limitando la quantità di pannelli fotovoltaici smaltiti in modo non corretto e evitando la lisciviazione di sostanze chimiche tossiche nell'ambiente.

Sica *et al.*, (2018) rende conto della quantità di Piombo presente nei moduli c-Si (da 1,64 a 11,4 g) e del Cadmio presente nei moduli CdTe (0,32-11,4 g). Poiché la lisciviazione del Piombo varia dal 13% in condizioni di pH 6-7 al 90% in condizioni di pH 3-4, i valori di lisciviazione sono molto superiori a quelli che ci si aspetta per il Cadmio (29% e 40%, rispettivamente). Sulla base di queste valutazioni, sempre Malandrino *et al.* (2017) valutano che il costo relativo all'inquinamento causato dalla lisciviazione di materiale contenente Piombo e Cadmio impropriamente smaltito può essere stimato in 1174 €/kg e 46 €/kg, rispettivamente. Sulla base di queste stime è possibile effettuare delle stime analoghe che servano di base per le valutazioni del mancato danno ambientale, calcolato come danno economico, provocato da un corretto processo di riciclaggio dei pannelli fotovoltaici negli anni. Ad esempio Sica *et al.* (2018), tentano un computo del danno ambientale da lisciviazione di Piombo derivante dai moduli c-Si e di Cadmio dai moduli CdTe non correttamente riciclati/smaltiti a fine vita. Gli autori calcolano in 1741,2 le tonnellate di Piombo liscivate e in 302,5 le tonnellate di Cadmio, con un costo derivante di circa 2 miliardi di euro per il Piombo e 14 milioni di euro per il Cadmio, complessivi al 2050. Questo tipo di computo è relativo al solo aspetto legato alla salute umana (BioIntelligence, 2011). Molto altro potrebbe essere detto sul più vasto e difficile da quantificare aspetto del danno ambientale, legato ad esempio all'inquinamento atmosferico o delle falde acquifere. Analisi più approfondite su questi aspetti sono necessarie per una quantificazione economica più attendibile di un possibile danno da lisciviazione.

## Valutazione delle emissioni di GHG degli impianti fotovoltaici e LCA

Per quanto riguarda le emissioni di sostanze climalteranti (GHG emission), è bene ricordare che questo tipo di analisi hanno un senso se correlati all'intero ciclo industriale di un prodotto. Le fasi da considerare per l'analisi delle emissioni climalteranti sono 4: estrazione e fabbricazione; installazione; vita operativa e mantenimento; fine vita (Nugent & Sovacool, 2014). L'unità di misura considerata per valutare le emissioni di gas climalteranti è l'emissione di CO<sub>2</sub>-eq/kWh misurata in grammi.

Per la parte che riguarda il presente lavoro, molti contributi scientifici partono dal presupposto che, poiché le pratiche di decommissioning sottraggono materiali allo smaltimento tal quale, proiettandoli verso futuri cicli produttivi, questa può essere considerata una fase con emissioni di CO<sub>2</sub>-eq di tipo negativo (Nugent & Sovacool, 2014).

Il lavoro di Nugent & Sovacool (2014) analizza, su questi argomenti, 23 studi sul lifecycle dei pannelli fotovoltaici. I lavori, arrivano a quantificazioni differenti di emissioni di CO<sub>2</sub>-eq/kWh a seconda delle differenti tipologie di pannelli esaminate. Tali differenze dipendono da:

- I differenti materiali e processi costruttivi utilizzati, i quali presentano fattori emissivi diversi;
- Le differenti prestazioni in termini di efficienza dei diversi tipi di pannello, che giocano un ruolo fondamentale nella definizione del Lifecycle assessment.
- La location, le dimensioni dell'impianto e la sua longevità, che incidono in modo notevole sull'efficienza produttiva e quindi sulle emissioni complessive.
- La maggiore o minore considerazione nel computo finale delle emissioni derivate dai trasporti delle materie prime, dai trasporti necessari per l'installazione e il decommissioning.
- Il metodo di calcolo delle emissioni, che può generare risultati anche molto differenti.

Nugent & Sovacool (2014) nel loro lavoro effettuano una analisi delle emissioni di gas climalteranti derivanti dal ciclo di vita delle differenti tecnologie di fotovoltaico (Tab. 11). Anche se in 5 casi (in grassetto nella tabella) i valori non sono mediati in quanto provenienti dall'analisi di un solo campione, il discorso generale è molto interessante.

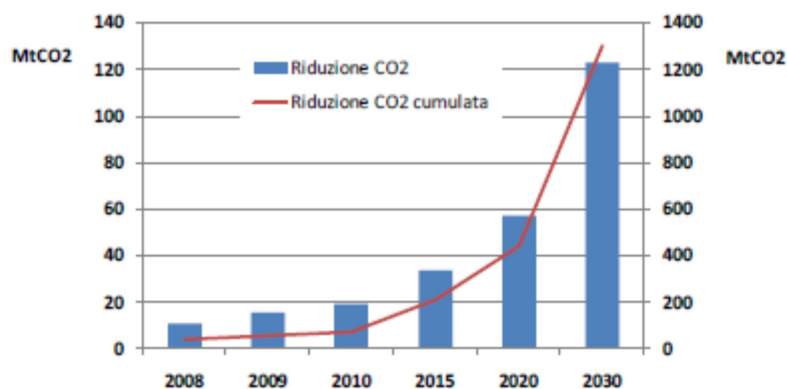


tecnologia	Emissioni medie stimate (g CO <sub>2</sub> -eq/kWh)	n° campioni
Ribbon-Si	33,87	4
CdTe	19,39	7
Mono-Si	79,48	6
Multi-Si	44,34	17
Micromorph	<b>20,9</b>	<b>1</b>
CIGS	26,5	2
Indium-tin-oxide	47,21	2
Organic/plastic	<b>109,84</b>	<b>1</b>
Poli-Si	63,95	2
a-Si	20,5	2
c-Si	34,5	4
CdSe QDPV	<b>5</b>	<b>1</b>
DSC dye sensitizes	<b>106,25</b>	<b>1</b>
Poli-SOG-Si	<b>104</b>	<b>1</b>
-	88,57	4

**Tabella 11:** Emissioni medie di GHG stimate per le differenti tipologie di pannello (Elaborazione ENEA da Nugent & Sovacool, 2014)

Dalla stima delle emissioni medie di GHG per i diversi tipi di pannello, si vede come quelli meno impattanti dal punto di vista delle emissioni climalteranti siano i pannelli a Telluro di Cadmio (con una media emissiva di 19,39 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh), seguiti dai pannelli a Silicio amorfo (20,5 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh), dai pannelli CIGS (26,5 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh) e dai pannelli c-Si (34,5 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh). Da quanto detto, risulta chiaro come l'analisi delle emissioni climalteranti debba essere valutata alla stregua degli altri aspetti considerati quando si affronta il problema dell'impatto sull'ambiente delle tecnologie. Ovviamente la valutazione delle emissioni climalteranti è in funzione di una serie di fattori molto legati alle caratteristiche intrinseche degli impianti, e quindi queste indicazioni, che sono necessariamente generiche, debbono essere considerate esclusivamente come una indicazione di tendenza.

Anche la Federazione Italiana per l'Uso Razionale dell'Energia (FIRE) nella "Guida al fine vita degli Impianti Fotovoltaici" pubblicata nel 2018, fa una stima delle emissioni di CO<sub>2</sub> generate nel corso del ciclo di vita degli impianti (produzione, installazione, manutenzione e dismissione) come comprese tra i 35 e i 15 g di CO<sub>2</sub>eq/kWh, dove 35 è riferito ai moduli in silicio e i 15 ai moduli a film sottile. FIRE dichiara che buona parte di queste emissioni sono relative alla fase di produzione, e che comunque a livello globale, l'utilizzo del fotovoltaico ha permesso di evitare una notevole quantità di emissioni di CO<sub>2</sub> (Fig. 7).



**Figura 7:** Stima delle emissioni di CO<sub>2</sub> evitate a livello globale (2008-2030) mediante l'utilizzo dell'energia prodotta mediante fotovoltaico (FIRE, 2018)

Il tempo di ritorno dell'energia spesa per la produzione, denominato EPBT (Energy Payback Time) è sceso a valori compresi tra 1 e 3 anni, a fronte di una vita media degli impianti di 25 anni. Nel caso di applicazioni in paesi ad irraggiamento solare particolarmente elevato, l'EPBT può scendere fino a 6 mesi (FIRE, 2018). Il riciclo dei materiali ha un ulteriore impatto positivo sull'impronta ambientale, che è già particolarmente buona in rapporto ad altre tecnologie di precedente generazione. Fire, tuttavia, dichiara che il riciclo dei moduli è in grado di ridurre il consumo di energia primaria di un ulteriore 13% circa, anche se è necessario prestare attenzione alle tecnologie di riciclo utilizzate per differenti tipi di pannello. Ad esempio, Fire dichiara che per raggiungere questi risultati di riduzione è necessario che, per i pannelli a film sottile, vengano utilizzati processi non termici e che i benefici del recupero del vetro vengano considerati nel computo. Una notazione del genere rende conto della difficoltà di giungere ad una analisi LCA corretta, che cioè tenga conto di tutti gli aspetti necessari.

## Tentativo di quantificazione del potenziale danno ecologico del mancato riciclo dei pannelli fotovoltaici

Si è qui cercato, nei limiti del possibile, di delineare alcune stime di potenziale danno ecologico nel tempo, derivante dal mancato riciclaggio dei pannelli fotovoltaici installati in Italia. I calcoli sono stati eseguiti partendo da informazioni riscontrabili in letteratura.

I punti principali considerati nell'analisi di impatto ambientale del fine vita dei pannelli fotovoltaici, sono stati:

- Emissioni tossiche
- Rischi per la salute e la sicurezza.
- *Energy Pay back time*
- Emissione di gas serra
- Pericolo di lisciviazione elementi tossici

### Dati e analisi

Partiamo dal tentativo di definire una stima dei rifiuti da fotovoltaico prodotti negli anni in Italia, basandoci su quanto affermato da Paiano (2015), che partendo da dati sull'installato e dalla vita media dei pannelli attualmente in produzione (25-30 anni) fa una stima dei MW di fotovoltaico dismessi nel periodo 2012-2050 e ne riconverte il valore in tonnellate (Tab. 12).

	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
<b>TOT</b>	4352	571	785	999	428	1783268	649261	634973	740135	171460

**Tabella 12:** stima (MW/t) di fotovoltaico dismessi nel periodo 2012-2050 (Elaborazione ENEA da Paiano, 2015).

Bisogna dire che altre fonti riportano computi leggermente diversi rispetto alle stime di Paiano (2015), che dichiara una produzione di 8.238.967 di tonnellate di rifiuti da fotovoltaico, dal 2012 al 2050, tenendo conto di tutte le tipologie di pannello. IRENA (2016), ad esempio, stima in 7.245.850 le tonnellate di rifiuti prodotte in Italia dal 2016 al 2050, cioè circa 1 milione di tonnellate in meno rispetto a quelle calcolate da Paiano. Per le analisi che seguono, tuttavia, si è scelto di utilizzare i dati di Paiano.

Per fare una stima di emissione in ambiente dei differenti elementi presenti nei pannelli fotovoltaici, avevamo la necessità di individuare possibili stime di dispersione nell'ambiente degli elementi chimici contenuti nei pannelli fotovoltaici.

IRENA (2016) riporta i potenziali percorsi di mobilitazione dei componenti e dei materiali di cui sono formati i pannelli solari, al fine di identificare i potenziali pericoli per l'ambiente e la salute umana originati dalla gestione del fine vita del fotovoltaico. Il rischio legato al rilascio nell'ambiente dei materiali e dei

composti contenuti nei pannelli, soprattutto durante la fase di dismissione e trattamento è consistente, ed è quindi necessario definire le opportune misure di contenimento. IRENA (2016) rende conto di tre differenti metodi utilizzati per definire i livelli di lisciviazione delle sostanze. I metodi sono quelli usualmente utilizzati negli Stati Uniti, in Germania e in Giappone (Tab. 13).

	<b>Stati Uniti</b>	<b>Germania</b>	<b>Giappone</b>
Test di lisciviazione	Metodo 1311 US Environment Protection Agency (TCLP)	Standard 12457-4:01-03 DIN EN German Institute for Standardization	Notice 13/JIS K Metodo 0102:2013 (JLT-13) Ministry of Environment
Dimensioni del campione (cm)	1	1	0,5
Solvente	Acetato di sodio/acido acetico (pH 2,88 per i rifiuti alcalini; pH 4,93 per i rifiuti da neutri ad acidi)	Acqua distillata	Acqua distillata
Rapporto solido/liquido per il test di lisciviazione (ad es. quantità di liquido utilizzato in relazione alla quantità di materiale solido)	20:1	10:1	10:1
Metodo di trattamento	Agitazione end-over-end (30 ± 2 rotazioni per minuto)	Agitazione end-over-end (5 rotazioni per minuto)	Agitazione end-over-end (200 rotazioni per minuto)
Temperatura del test	23±2°C	20°C	20°C
Durata del test	18±2 hr	24 hr	6 hr

**Tabella 13:** Differenti Test di Lisciviazione (IRENA, 2016).

I metodi di lisciviazione sono utilizzati per determinare il tenore della presenza di elementi disciolti in acqua (tipicamente mg/l), rapportato ai limiti di legge che, ovviamente, variano a seconda delle legislazioni nazionali. BIO Intelligence Service (2011) prova a fare dei calcoli sulla lisciviazione di Piombo e Cadmio. I moduli di prima generazione (c-Si), smaltiti direttamente senza alcun tipo di trattamento, sottoposti ad ambiente moderatamente acido, possono rilasciare nell'ambiente tra il 13% e il 90% del Piombo in essi contenuto, ovvero tra 1,64 g e 11,4 g per pannello (peso medio dei pannelli considerati circa 22 kg) ovvero tra 75 e 518 g per tonnellata di pannello dismesso (Bio Intelligence Service, 2011). I moduli CdTe, smaltiti direttamente senza alcun tipo di trattamento, sottoposti ad ambiente moderatamente acido, possono rilasciare nell'ambiente tra il 29% e il 40% del Cadmio contenuto in essi (peso medio dei pannelli considerati circa 12 Kg), ovvero da 0,32 a 1,84 g per pannello, oppure da 27 a 153 g per tonnellata di pannello dismesso (Bio Intelligence Service, 2011). Allo scopo di misurare proprio la possibile liberazione in ambiente di elementi potenzialmente tossici dai pannelli fotovoltaici dismessi, Tammaro *et al.* (2016) compiono un interessante esperimento, misurando in laboratorio la possibile lisciviazione degli elementi chimici contenuti in un certo numero di campioni di celle fotovoltaiche al Silicio cristallino (c-Si) e a Film sottile (TF). Nel lavoro si confrontano i dati di 26 campioni di pannelli c-Si, di costruzione compresa tra il 1985 e il 2012, e di 12 campioni di pannelli TF, di costruzione compresa tra il 1993 e il 2011 (8 pannelli a-Si; 3 CdTe e 1 CIGS). La

composizione dei pannelli è molto varia, a causa delle modalità costruttive e delle modificazioni nel tempo subite dalle tecnologie considerate. La provenienza dei pannelli utilizzati, inoltre, varia ampiamente. Per i C-Si abbiamo il 54% di pannelli italiani, contro il 19% di provenienza europea, il 15% orientale, l'8% dal Giappone, il 4% dagli USA. Per i TF abbiamo il 75% dei campioni che proviene dagli USA, il 17% dall'oriente e l'8% dall'Europa. Le provenienze geografiche così variegata testimoniano anch'esse delle differenze di produzione e di elementi chimici contenuti nei campioni analizzati. Per le necessità legate alle analisi, i campioni di celle fotovoltaiche sono stati ridotti in frammenti compresi tra 0,5 e 3 cm<sup>2</sup>. Il test di lisciviazione è stato attuato utilizzando la procedura standard italiana e europea, che prevede l'utilizzo di acqua pura e una esposizione per 24 h (per ulteriori informazioni sulla metodologia utilizzata, si rimanda al lavoro di Tammaro *et al.*, 2016). I campioni così ottenuti sono stati analizzati sia in modo diretto (campioni non filtrati), sia filtrati attraverso una membrana di acetato di cellulosa da 0,45 µm, ricercando gli elementi potenzialmente rilasciabili nell'ambiente e 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. Per estensione, nel presente lavoro si sono considerati invece i rilasci misurati attraverso filtrazione come potenziali rilasci in ambiente da scarica controllata, in considerazione delle modalità contenitive con cui queste sono usualmente realizzate. Le scariche controllate, infatti, tendono a contenere i rilasci di sostanze nell'ambiente, anche se, nel tempo, gli strati contenitivi possono dare origine a rilasci parziali, a causa di rotture o fessurazioni. Mentre per la modalità non filtrata l'equiparazione all'abbandono tal quale in natura I risultati ottenuti, espressi in µg/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.) (Tab. 14).

Elemento chimico	DW	WS
	(µg/L)	
Al	200	1000
As	-	-
Ba	-	-
Cd	5	-
Cr tot	50	1000
Cu	1000	100
Mn	50	200
Mo	-	-
Ni	20	200
Pb	10	100
Sb	5	-
Se	10	2
Sn	-	3000
Zn	-	500

**Tabella 14:** Elementi chimici contenuti nei pannelli fotovoltaici e limiti di legge previsti 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.). Elaborazione ENEA su dati Tammaro *et al.*, 2016.

I risultati ottenuti da Tammaro *et al.* (2016) sono riassunti nelle seguenti tabelle (Tab. 15 e 16):

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%

**Tabella 15:** 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)

TF	Al	Cr	Mn	Cu	Cd	Pb	Se	Sn	Zn	Te	Sb	Ag	Ga	In	Mo	Ba	Ni	As
Law limit (µg/L)	200/1000	50/1000	50/200	1000/100	5/-	10/100	10/2	-/3000	-/500	-/-	5/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	20/200	10/50
non filtrato	9/12	3/12	0/12	1/12	4/12	5/12	5/12	0/12	1/12	0/12	0/12	0/12	0/12	0/12	0/12	0/12	1/12	0/12
filtrato	6/12	3/12	0/12	0/12	4/12	3/12	7/12	0/12	0/12	0/12	0/12	0/12	0/12	0/12	0/12	0/12	1/12	0/12
N° campioni positivi n.f.	12/12	10/12	7/12	10/12	5/12	7/12	5/12	6/12	11/12	4/12	1/12	3/12	1/12	1/12	5/12	8/12	7/12	0/12
%	100%	83%	58%	83%	42%	58%	42%	50%	92%	33%	8%	25%	8%	8%	42%	67%	58%	0%
N° campioni positivi f.	12/12	8/12	5/12	7/12	8/12	11/12	7/12	10/12	9/12	7/12	1/12	3/12	5/12	1/12	8/12	9/12	6/12	0/12
%	100%	67%	42%	58%	67%	92%	58%	83%	75%	58%	8%	25%	42%	8%	67%	75%	50%	0%

**Tab. 16:** Dati di lisciviazione (µg/L) per campioni provenienti da 12 pannelli di tipo TF. Le celle evidenziate in giallo sono relative agli elementi chimici presenti solo nei pannelli TF e non in quelli 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).

Dall'analisi delle tabelle, si evince come gli elementi ricercati nei pannelli c-Si siano 15 (Alluminio, Cromo, Manganese, Rame, Cadmio, Piombo, Selenio, Stagno, Zinco, Tellurio, Antimonio, Argento, Molibdeno, Bario, Nichel), mentre sono 18 quelli ricercati nei pannelli TF. I tre elementi in più ritrovati nei pannelli TF rispetto ai c-Si sono il Gallio (Ga), l'Indio (In) e l'Arsenico (As), come atteso in conseguenza delle diverse tecnologie impiegate.

I limiti di legge riportati nelle tabelle sono: carattere sottolineato = Direttiva 98/83EC, 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 n.f e f. riporta invece il numero di campioni risultati positivi all'elemento chimico ricercato, pur essendo le quantità riscontrate inferiori ai limiti di legge.

Per meglio esplicitare il dato riportato, consideriamo, ad esempio, la tabella c-Si. Vediamo che nella prima colonna, quella relativa all'Alluminio, tra i campioni non filtrati, ben 20 su 26 superano i limiti di legge (Direttiva 98/83 EC; T.U.A.). Tra i campioni filtrati 12 su 26 superano i limiti di legge. Considerando, però, il numero di campioni comunque risultati positivi, vediamo che sia i campioni filtrati che quelli non filtrati risultano positivi alla presenza dell'Alluminio, con quantitativi superiori a 3,0 µg/L. E così via, per tutti gli altri elementi analizzati.

Dalla tabella 16 relativa ai pannelli con tecnologia c-Si, si evince che, oltre all'Alluminio, anche il Piombo risulta presente nel 100% dei campioni analizzati filtrati, mentre è presente nel 92% di quelli non filtrati.

Lo Zinco è presente nel 100% dei campioni non filtrati e nell'85% di quelli filtrati, anche se in quantità sempre inferiori ai limiti di legge.

Cromo, Manganese, Rame, Stagno, Tellurio, Argento, Molibdeno e Bario sono presenti, sempre sotto i limiti di legge, in percentuali variabili dal 4% (Molibdeno) all'88% (Stagno) dei campioni positivi non filtrati e dal 23% (Manganese) al 46% (Molibdeno) dei campioni positivi filtrati.

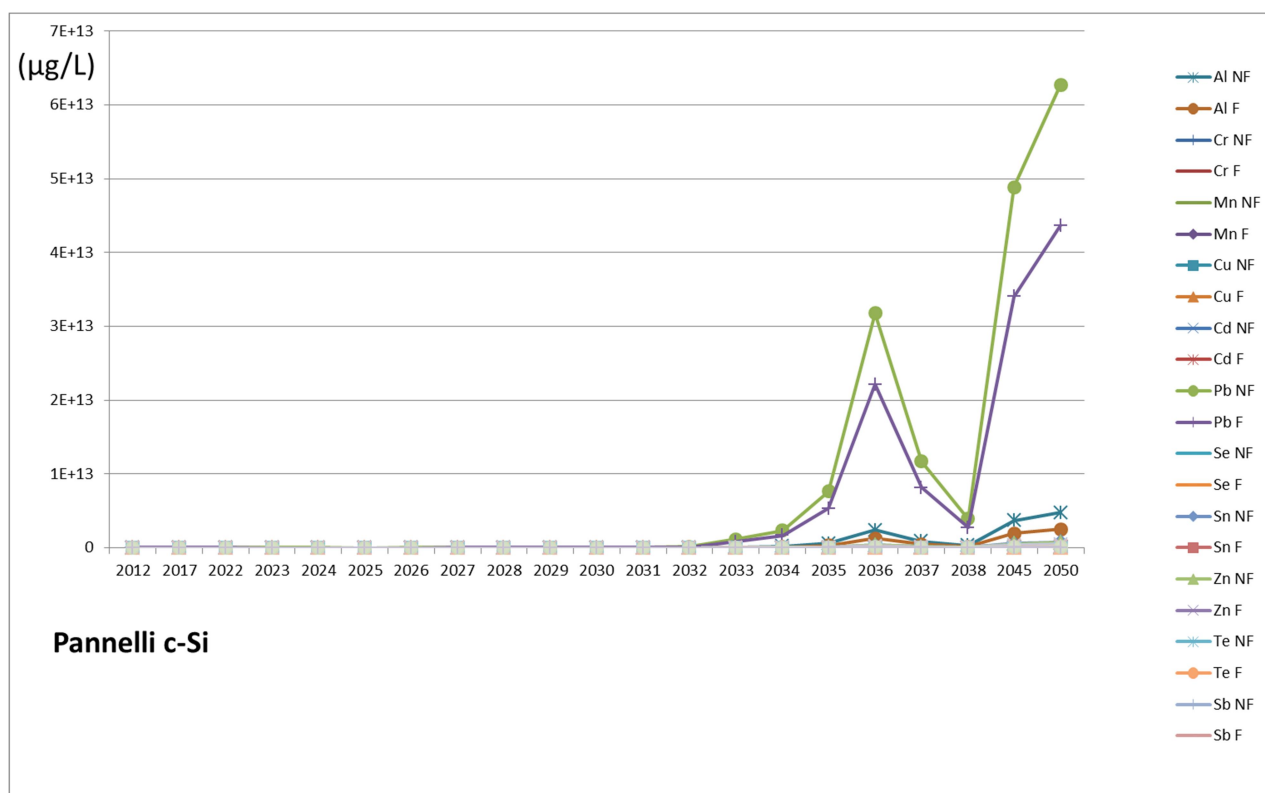
Alluminio, Cadmio, Piombo, Selenio, Antimonio e Nichel risultano presenti in quantità che superano spesso i limiti di legge. La loro presenza è comunque rilevata in percentuali variabili dal 15% (Selenio) al 100% (Alluminio) dei campioni positivi non filtrati e dal 23% (Selenio) al 100% (Alluminio e Piombo) dei campioni positivi filtrati.

Per quanto riguarda i pannelli con tecnologia TF, dall'analisi della tabella 17 si evince che Alluminio, Cromo, Cadmio, Piombo, Selenio e Nichel sono presenti in quantità che superano i limiti di legge sia nei campioni positivi filtrati che in quelli non filtrati; Rame e Zinco superano i limiti di legge nei soli campioni positivi non filtrati.

Le % di Alluminio, Cromo, Cadmio, Piombo, Selenio, Nichel, Rame e Zinco variano dal 42% (Cadmio e Selenio) al 100% (Alluminio) dei campioni positivi non filtrati e dal 50% (Nichel) al 100% (Alluminio) dei campioni positivi filtrati.

Da evidenziare il caso dell'Arsenico, che, seppur atteso, non risulta mai presente nei campioni analizzati, almeno non in quantitativi superiori ai 3,0 µg/L.

Rielaborando i dati relativi ai µg/L dei diversi elementi lisciviati, riportati da Tammaro *et al.* (2016) con i dati di Tab. 12, relativi alle stime di tonnellate di rifiuti fotovoltaici dismessi nel periodo 2012-2050 (Paiano, 2015), otteniamo una stima dei potenziali rilasci negli anni degli elementi chimici contenuti nei pannelli c-Si (Fig. 8) e nei pannelli TF (Fig. 9), nei due casi di un abbandono tal quale nell'ambiente (paragonabile alla modalità non filtrata – NF) e di uno smaltimento tal quale in discarica (paragonabile alla modalità filtrata – F), come precedentemente esplicitato, sempre ovviamente riferito ad una durata di esposizione pari a 24 h. La flessione nella emissione di sostanze riscontrabile in tutte le figure successive, relativa agli anni 2036-2037, dipende dai dati riportati da Paiano (2015) sui pannelli fotovoltaici installati negli anni e le stime da lui effettuate sui relativi rifiuti prodotti negli anni.

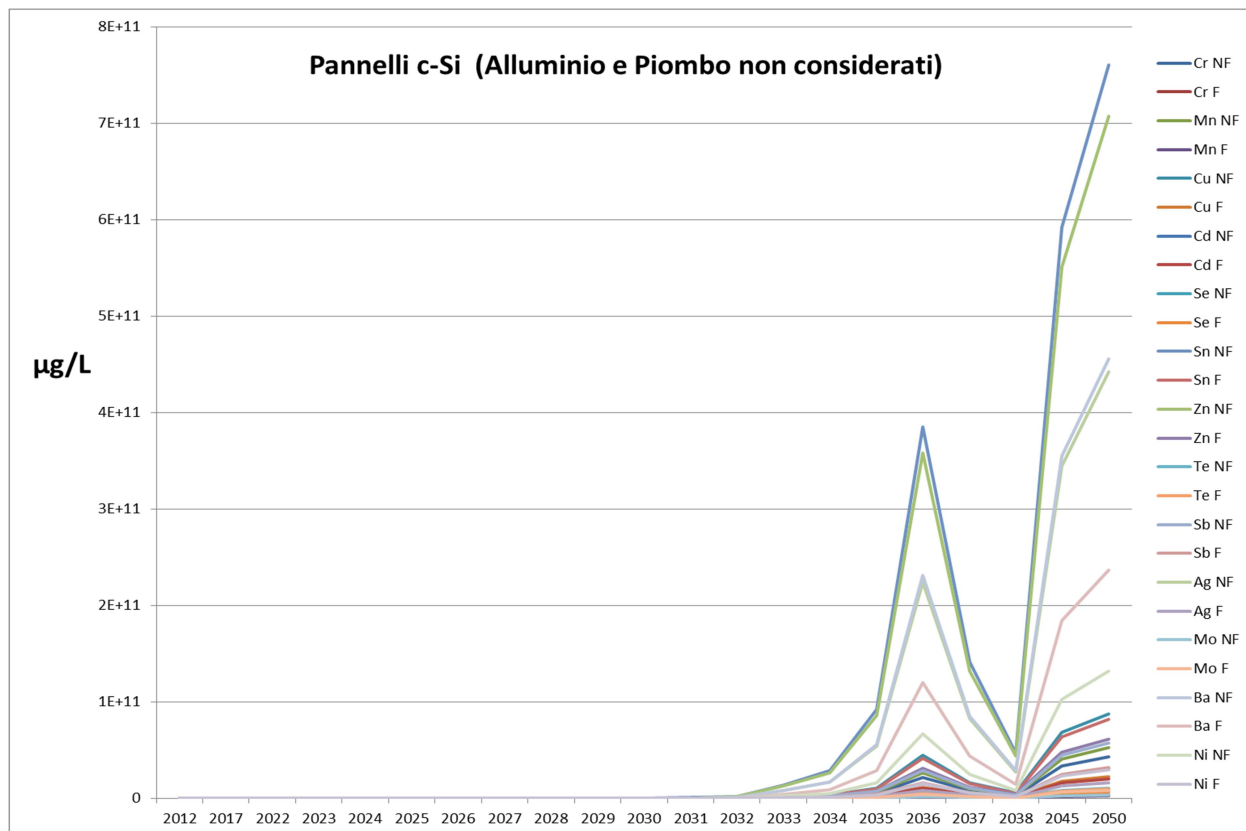


**Figura 8:** Dati di dispersione in ambiente tramite lisciviazione dei singoli elementi chimici contenuti nei pannelli c-Si. Proiezione al 2050. F = Filtrato; NF = Non Filtrato.

Come si può vedere dalla figura 8, per quanto riguarda i pannelli c-Si, il maggior pericolo di dispersione riguarda il Piombo (non filtrato e filtrato) che supera abbondantemente in quantità tutti gli altri elementi, seguito dall'Alluminio (non filtrato e filtrato).

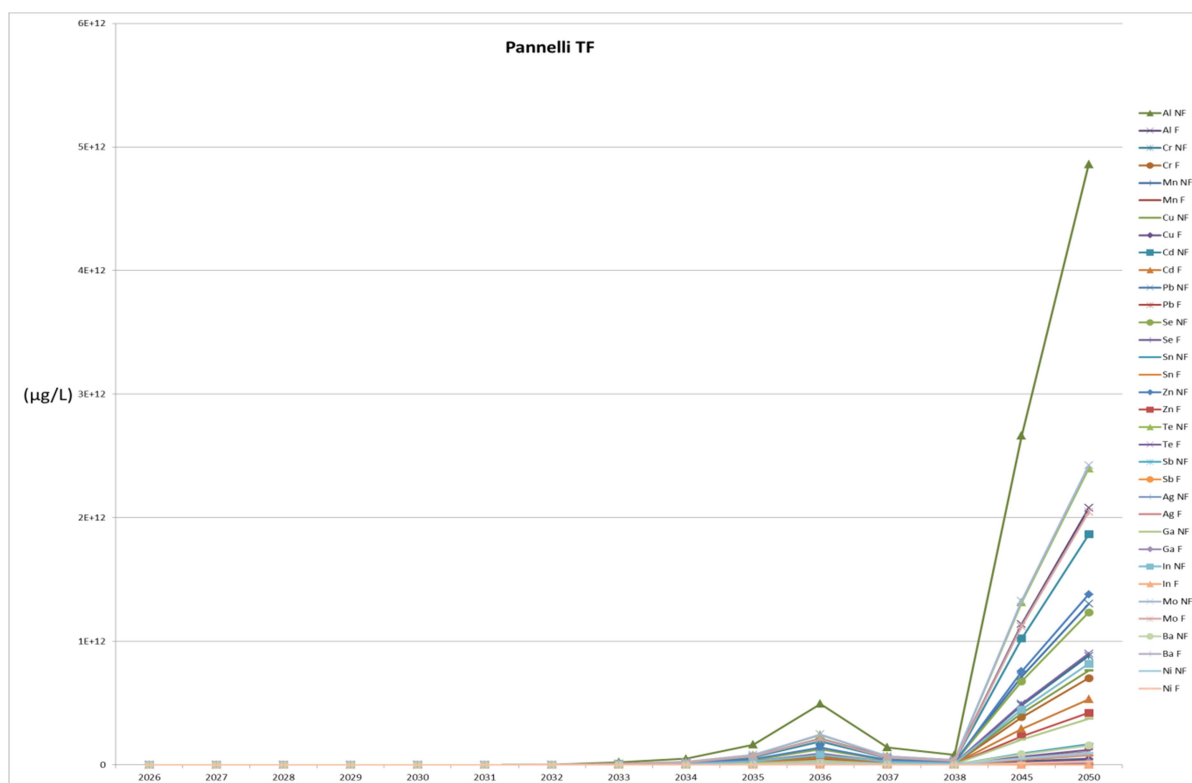


Per rendere più evidente l'andamento della dispersione in ambiente degli altri elementi contenuti nei pannelli c-Si, in Fig. 9 riportiamo gli andamenti di dispersione al netto di Piombo e Alluminio. Dalla figura si evince che i maggiori dati di dispersione riguardano lo Stagno e il Manganese, seguiti dal Bario e dall'Argento, tutti non filtrati.



**Figura 9:** Dati di dispersione in ambiente tramite lisciviazione ( $\mu\text{g/L}$ ) dei singoli elementi chimici contenuti nei pannelli c-Si, esclusi Piombo e Alluminio. Proiezione al 2050. F = Filtrato; NF = Non Filtrato.

Per quanto riguarda la fig. 10, relativa alla potenziale dispersione in ambiente tramite lisciviazione da pannelli TF, possiamo notare che i dati più alti di dispersione riguardano l'Alluminio e il Molibdeno non filtrati, seguiti da Molibdeno e Manganese filtrati, il Cadmio e lo Zinco non filtrato, il Piombo e il Selenio non filtrato, e così via, per quantità sempre minori di sostanze potenzialmente liscivate. Anche in questo caso risultano, ovviamente, più preoccupanti le quantità di elementi provenienti dalle situazioni non filtrate. Diminuisce, in questo caso, la pericolosità relativa alla dispersione del Piombo, mentre resta elevata quella relativa all'Alluminio.



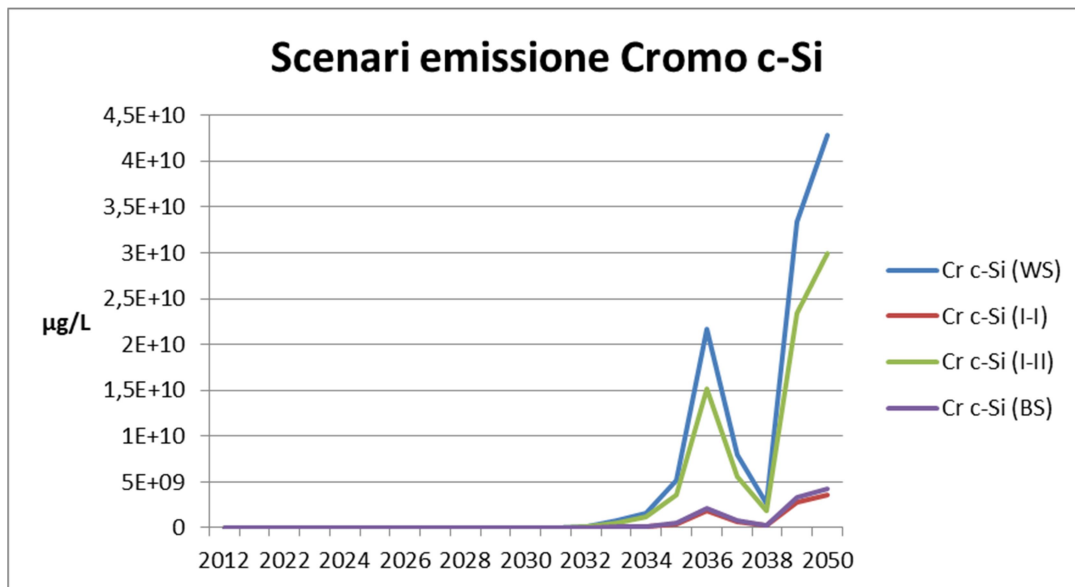
**Figura 10:** Dati di dispersione in ambiente tramite lisciviazione ( $\mu\text{g/L}$ ) dei singoli elementi chimici contenuti nei pannelli TF. Proiezione al 2050. F = Filtrato; NF = Non Filtrato.

Da notare come gli andamenti di dispersione risultino abbastanza differenti tra loro, sulla base della diversa tecnologia analizzata (c-Si e TF).

## Scenari

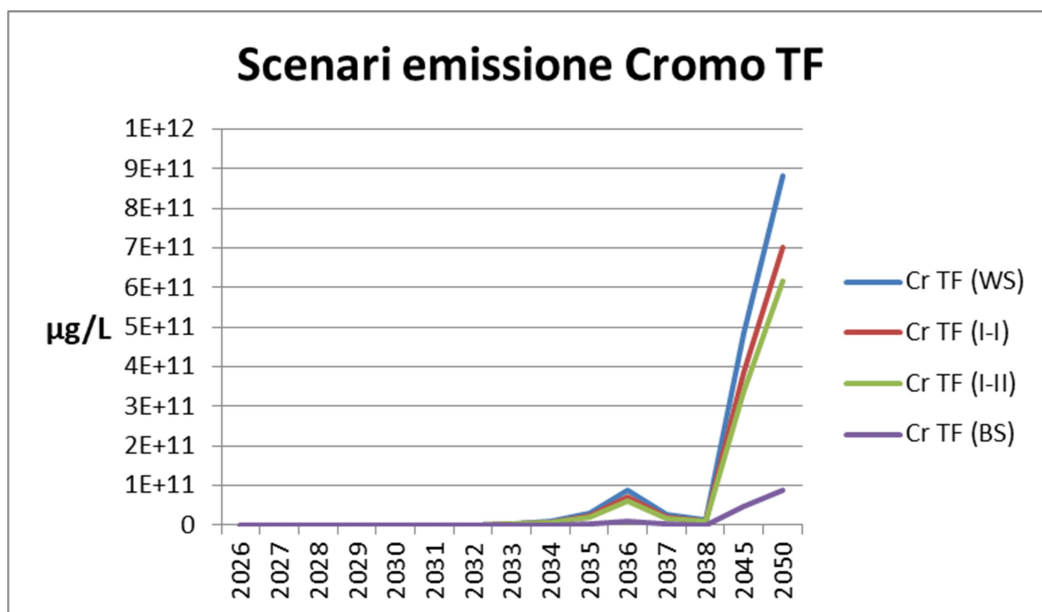
Si è cercato, a questo punto, di valutare la possibile dispersione in ambiente al 2050 di quattro elementi (Cadmio, Cromo, Nichel e Piombo), derivanti dalla dismissione dei pannelli fotovoltaici installati in Italia (c-Si e TF), secondo quattro differenti ipotesi di smaltimento:

1. *“Worst scenario” (WS)* - abbandono dei rifiuti tal quale in natura (corrispondente all’opzione “non filtrato”)
2. *“Intermediate I” (I-I)* - Smaltimento in discarica (corrispondente all’opzione “filtrato”)
3. *“Intermediate II” (I-II)* - riciclaggio del 30% dei pannelli a fine vita
4. *“Best scenario” (BS)* - riciclaggio del 90% dei pannelli a fine vita



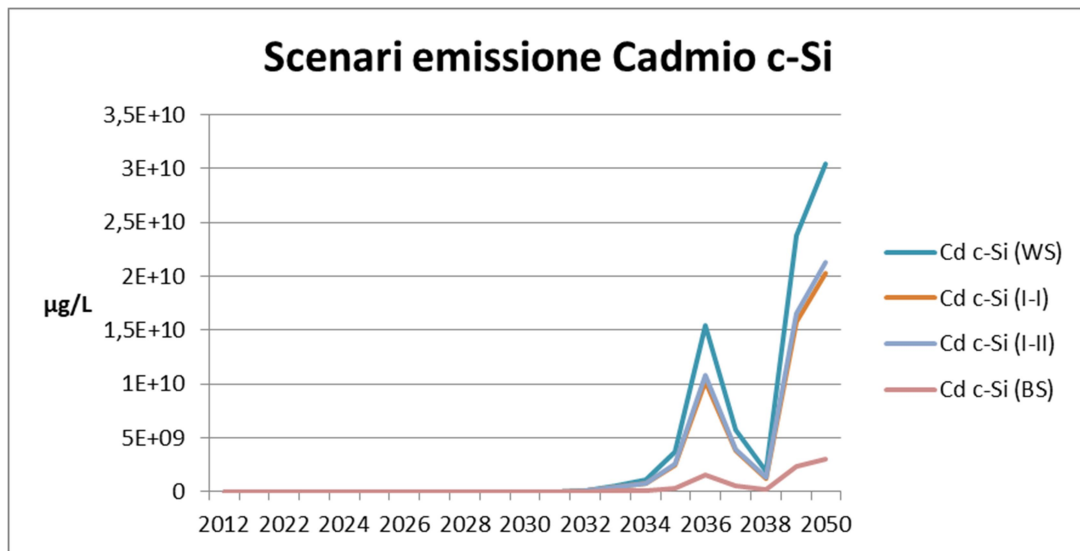
**Figura 11:** Scenari di emissione relativi al Cromo (c-Si). WS=*Worst Scenario*; I-I=*Intemediate I*; I-II=*Intermediate II*; BS= *Best Scenario*.

Da quanto emerso nell’analisi del Cromo proveniente da pannelli c-Si (Fig. 11), le situazioni più preoccupanti in termini di rilascio sono quelle relative al “Worst scenario”, seguito dallo scenario “Intermediate II”, poi dal “Best scenario”, quasi coincidente con lo scenario “Intermediate I”.



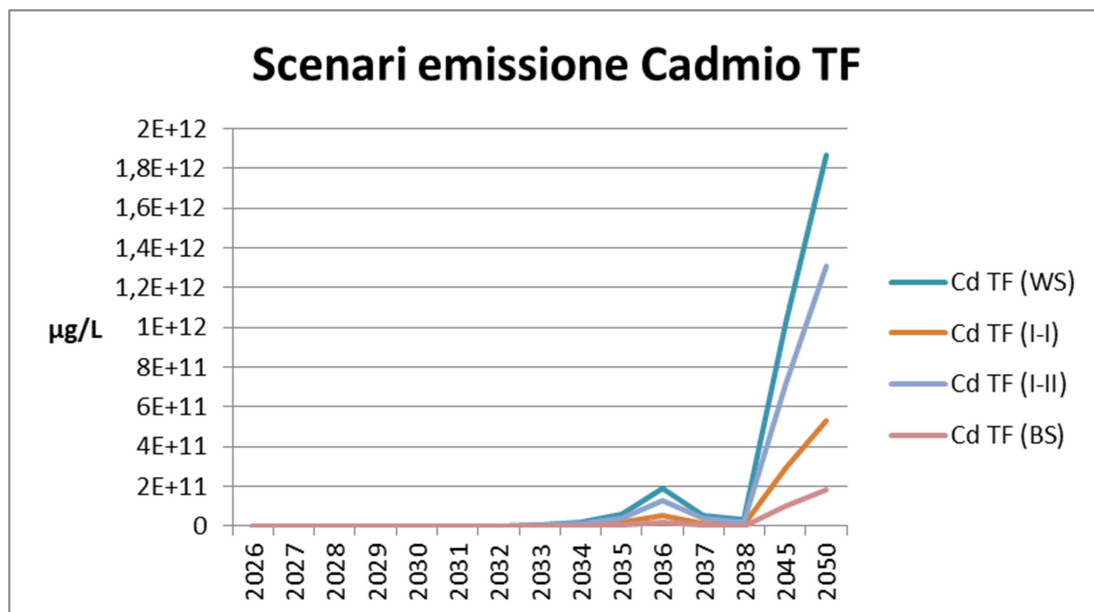
**Figura 12:** Scenari di emissione relativi al Cromo (TF). WS=*Worst Scenario*; I-I=*Intemediate I*; I-II=*Intermediate II*; BS= *Best Scenario*.

Nel caso relativo agli scenari del Cromo per i pannelli TF (Fig. 12), invece, “Worst scenario”, “Intermediate I” e “Intermediate II” mostrano quantità abbastanza simili. La differenza la fa, in positivo, una percentuale di riciclo vicino al 90% (“Best scenario”).



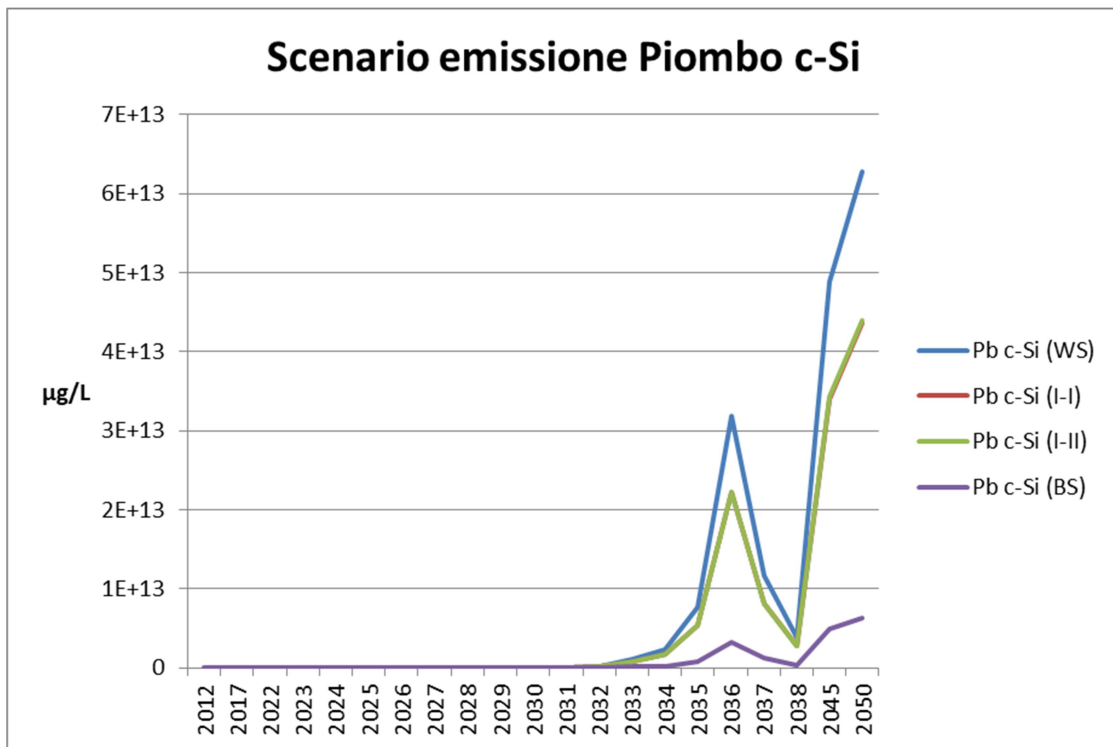
**Figura 13:** Scenari di emissione relativi al Cadmio (c-Si). WS=*Worst Scenario*; I-I=*Intemediate I*; I-II=*Intermediate II*; BS= *Best Scenario*.

Il Cadmio proveniente da pannelli c-Si (Fig. 13) si comporta in maniera simile. “*Worst scenario*”, “*Intermediate IP*” e “*Intermediate P*” mostrano quantità di emissione in ambiente tra loro simili. L’unica possibilità positiva è data dallo scenario al 90% di riciclo (“*Best scenario*”).



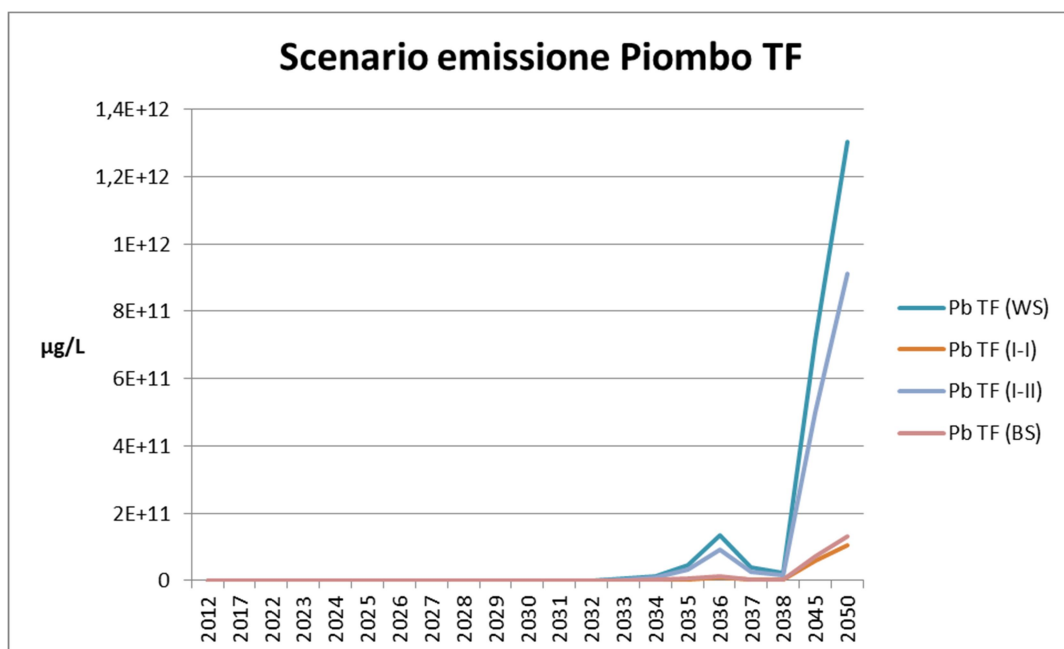
**Figura 14:** Scenari di emissione relativi al Cadmio (TF). WS=*Worst Scenario*; I-I=*Intemediate I*; I-II=*Intermediate II*; BS= *Best Scenario*.

Leggermente differente il Cadmio proveniente da pannelli TF (Fig. 14). “*Worst scenario*” e scenario “*Intermediate IP*” sono abbastanza confrontabili. Migliore invece lo scenario “*Intermediate P*”; ancora meglio lo scenario al 90% di riciclo (“*Best scenario*”).



**Figura 15:** Scenari di emissione relativi al Piombo (c-Si). WS=*Worst Scenario*; I-I=*Intemediate I*; I-II=*Intermediate II*; BS= *Best Scenario*.

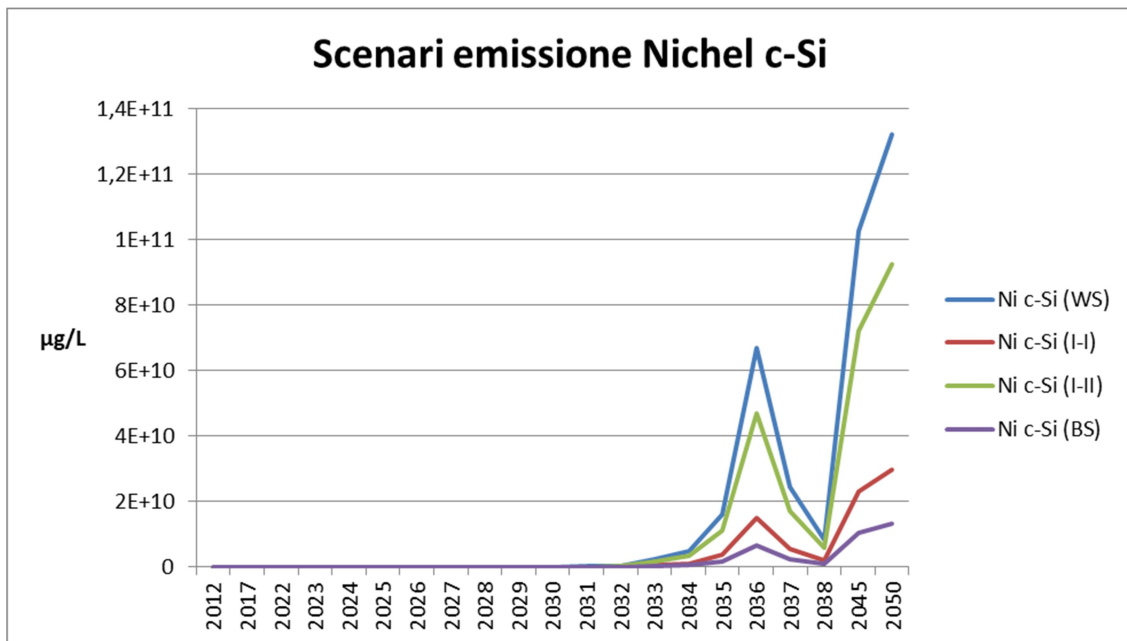
Diversa la situazione per il Piombo da pannelli c-Si (Fig. 15), dove il “*Worst scenario*” presenta in assoluto il valore più alto, mentre i valori per “*Intermediate I*” e “*Intermediate II*” risultano praticamente coincidenti. Molto più bassi i valori dello scenario al 90% di riciclo “*Best scenario*”.



**Figura 16:** Scenari di emissione relativi al Piombo (TF). WS=*Worst Scenario*; I-I=*Intemediate I*; I-II=*Intermediate II*; BS= *Best Scenario*.

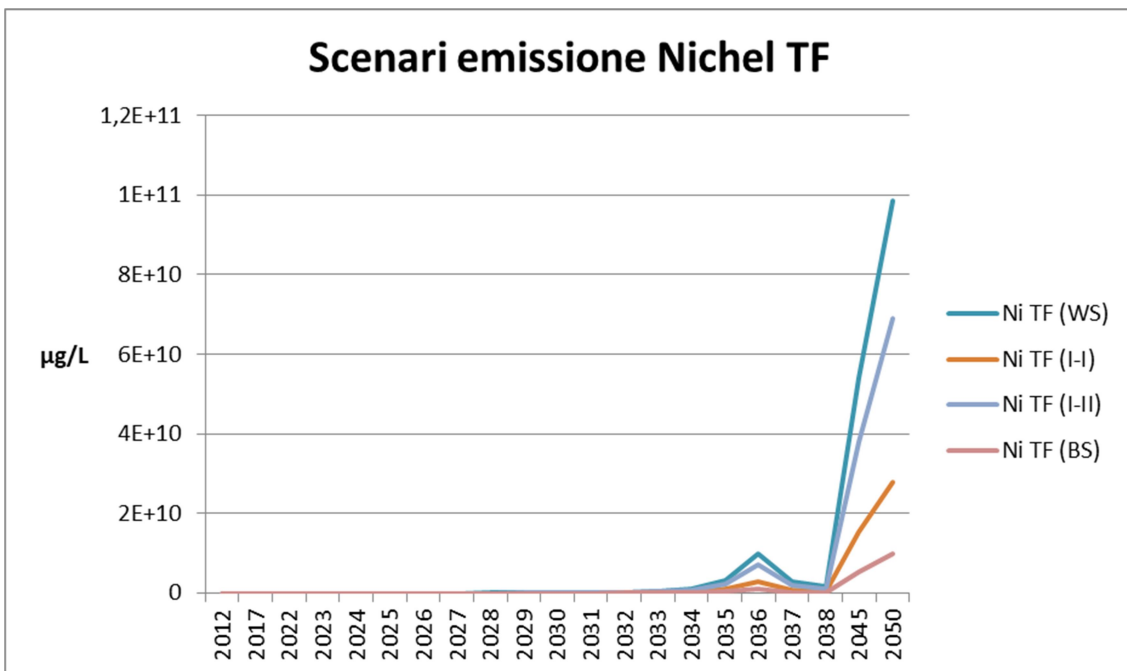
Un po’ differente lo scenario relativo al Piombo proveniente da pannelli TF (Fig. 16), dove “*Worst scenario*” e “*Intermediate II*”, pur essendo abbastanza distanti in termini assoluti di valori, risultano decisamente

superiori ai valori relativi allo scenario “*Intermediate I*” e al “*Best scenario*”, che risultano abbastanza confrontabili tra loro.



**Figura 17:** Scenari di emissione relativi al Nichel (c-Si). WS=*Worst Scenario*; I-I=*Intemediate I*; I-II=*Intermediate II*; BS= *Best Scenario*.

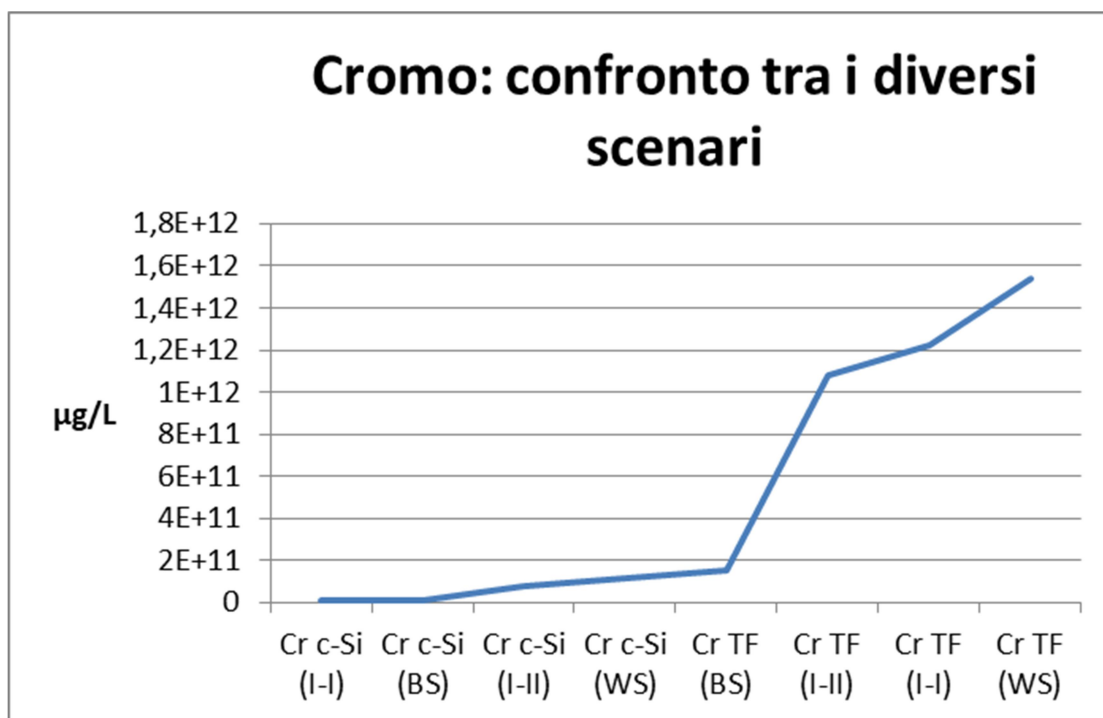
Situazione abbastanza simile alla precedente si può notare per il Nichel da pannelli TF (Fig. 17) e da pannelli TF (Fig. 18), dove le situazioni relative allo scenario “*Intermediate I*” e al “*Best scenario*” risultano abbastanza confrontabili.



**Fig. 18:** Scenari di emissione relativi al Nichel (TF). WS=*Worst Scenario*; I-I=*Intemediate I*; I-II=*Intermediate II*; BS= *Best Scenario*.

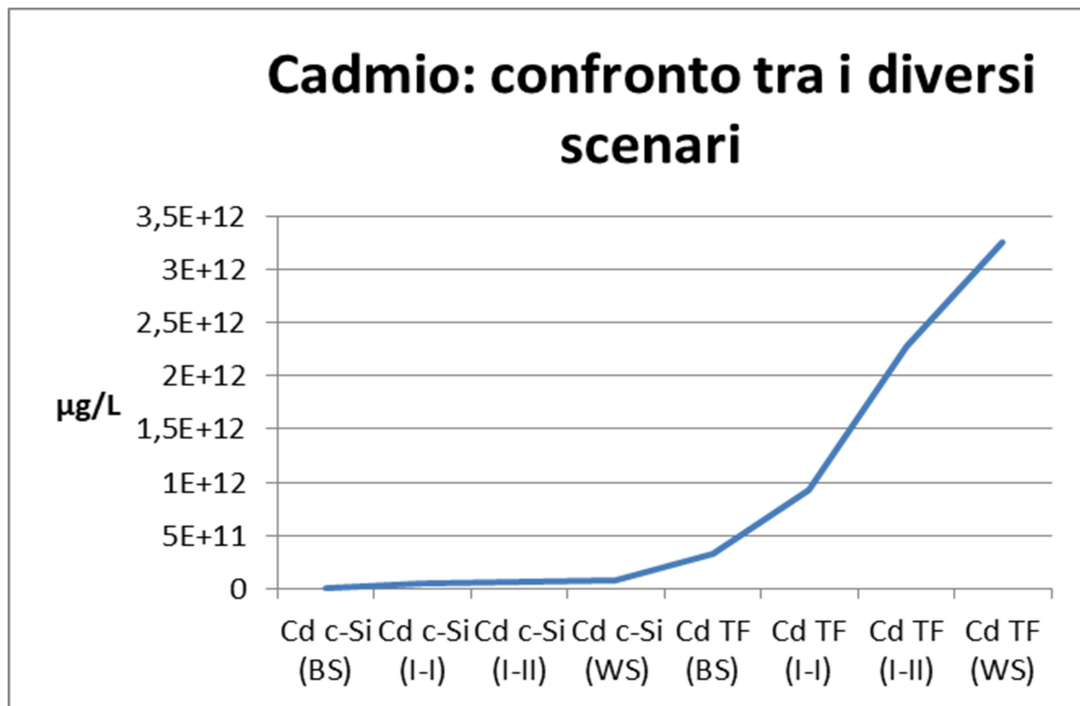
Per quanto riguarda gli scenari relativi alle emissioni di Nichel da pannelli TF, notiamo, dalla Fig. 18, che *Worst Scenario* e *Intermediate I* presentano valori decisamente più alti di lisciviazione rispetto all'*Intermediate I* e al *Best Scenario*.

Di seguito riportiamo gli andamenti del totale delle emissioni per elemento considerato (cumulato per gli anni dal 2012 al 2050), in relazione allo scenario e alle due tipologie di pannello considerato. Gli andamenti permettono di considerare il peso degli impatti dei quattro elementi qui considerati nei differenti scenari, in funzione della tecnologia analizzata.



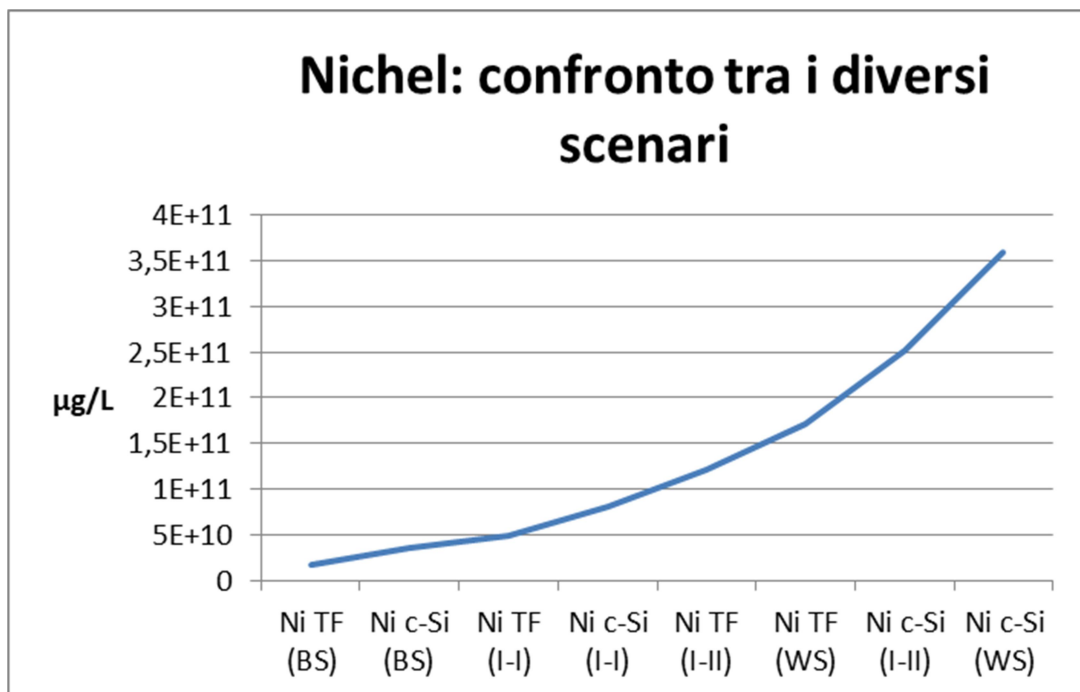
**Figura 19:** Andamento della quantità di Cromo rilasciata in ambiente nei differenti scenari a seconda della tecnologia considerata (C-Si – TF). WS=*Worst Scenario*; I-I=*Intermediate I*; I-II=*Intermediate II*; BS=*Best Scenario*.

Per quanto riguarda il Cromo (Fig. 19), si nota come le emissioni siano in generale superiori per la tecnologia TF rispetto a quella c-Si. In generale, le emissioni previste per la tecnologia c-Si risultano abbastanza simili tra loro dal punto di vista quantitativo. Abbastanza differenti le previsioni, invece, se si considerano il “*Best scenario*” e “*Worst scenario*” per la tecnologia TF. Il BS per la tecnologia TF risulta essere di livello paragonabile con le emissioni della tecnologia c-Si.



**Figura 20:** Andamento della quantità di Cadmio rilasciata in ambiente nei differenti scenari a seconda della tecnologia considerata. WS=*Worst Scenario*; I-I=*Intermediate I*; I-II=*Intermediate II*; BS=*Best Scenario*.

Gli andamenti per il Cadmio (Fig. 20) risultano abbastanza simili a quelli del Cromo. La tecnologia c-Si presenta possibili emissioni in ambiente abbastanza confrontabili. La tecnologia TF, invece, presenta uno scarto marcato tra le previsioni relative al “*Best scenario*” e la situazione “*Worst scenario*”.

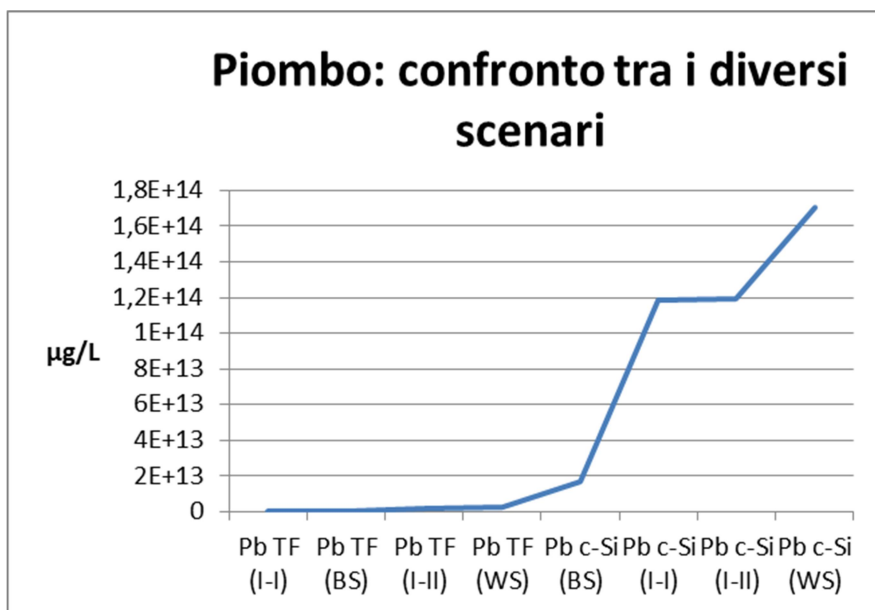


**Figura 21:** Andamento della quantità di Nichel rilasciata in ambiente nei differenti scenari a seconda della tecnologia considerata. WS=*Worst Scenario*; I-I=*Intermediate I*; I-II=*Intermediate II*; BS=*Best Scenario*.

L’andamento per il Nichel (Fig. 21) sembra insieme più lineare e non così marcato dal punto di vista della tecnologia considerata. I valori più bassi sono infatti quelli del “*Best scenario*” sia per tecnologia TF che c-



Si, seguiti dallo scenario “*Intermediate P*”, dall’“*Intermediate IP*” e dal “*Worst scenario*” per la tecnologia TF, “*Intermediate IP*” e “*Worst scenario*” per la tecnologia c-Si.



**Figura 22:** Andamento della quantità di Piombo rilasciata in ambiente nei differenti scenari a seconda della tecnologia considerata. WS=*Worst Scenario*; I-I=*Intermediate I*; I-II=*Intermediate II*; BS=*Best Scenario*.

L’andamento per il Piombo sembra più variegato (Fig. 22), dove i livelli di lisciviazione per la tecnologia TF sono pressoché pari allo zero per tutti e quattro gli scenari, mentre si osserva una lisciviazione crescente, a partire dal “*Best scenario*” a riciclo 90%, all’“*Intermediate P*”, all’“*Intermediate IP*”, fino ad arrivare al “*Worst scenario*”.

## Risultati

Nel presente lavoro abbiamo provato a:

1. quantificare la produzione dei rifiuti da fotovoltaico (MW - t) nel periodo 2012-2050, per le diverse tecnologie attualmente in essere (c-Si, a-Si, Cd-Te, CIGS, tecnologie emergenti);
2. definire l'elenco degli elementi/sostanze contenute all'interno delle diverse tipologie di pannello fotovoltaico, la loro percentuale di presenza, la percentuale di riciclabilità;
3. individuare i principali percorsi di mobilitazione 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;
4. quantificare la potenziale lisciviazione ( $\mu\text{g/L}$ ) 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); Va qui ricordato che la lisciviazione calcolata è riferita ad un periodo di 24 h, come precedentemente specificato nel lavoro.
5. l'applicazione di questi 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 provenienti da pannelli c-Si e da pannelli TF), caratterizzati da un elevato impatto sul comparto ambientale e sulla salute umana: *Worst scenario* (scenario peggiore; abbandono dei rifiuti; **WS**); *Intermediate I* (scenario intermedio I; smaltimento in discarica; **I-I**); *Intermediate II* (scenario intermedio II; riciclaggio del 30% dei pannelli a fine vita; **I-II**); *Best scenario* (scenario migliore; riciclaggio del 90% dei pannelli; **BS**);
6. una valutazione del variare delle emissioni relative a quattro elementi (Cromo, Cadmio, Nichel e Piombo) sulla base della tecnologia considerata.

Per quanto riguarda la quantificazione della produzione dei rifiuti da fotovoltaico (**punto 1**), Paiano (2015) fa una stima di 8.238.967 di tonnellate di rifiuti prodotte in Italia nel periodo 2012-2050, contro la stima di IRENA (2016) di circa 1 milione di tonnellate in meno, ovvero 7.245.850 di tonnellate prodotte in Italia nel periodo 2016-2050. Le differenze possono essere dovute, in minima parte, al diverso arco temporale considerato. Stiamo comunque parlando di quantitativi notevoli, che testimoniano della necessità di pianificare per tempo le attività di raccolta, trattamento, riciclaggio, al fine anche di evitare i possibili danni ambientali e alla salute derivati da uno smaltimento non adeguato.

Per quanto riguarda la definizione degli elementi/sostanze contenute all'interno delle diverse tipologie di pannello fotovoltaico, la loro percentuale di presenza e di riciclabilità (**punto 2**), si deve dire che, nonostante la vasta presenza di lavori che affrontano l'argomento (tra gli altri si ricordano Fthenakis, 2000; Paiano, 2015; Tammaro *et al.*, 2016; Malandrino *et al.*, 2017; Sica *et al.*, 2018), anche se l'elenco di sostanze sembra

abbastanza esaustivo, le informazioni relative alle percentuali di presenza e a quelle di riciclabilità risultano ancora abbastanza carenti. Intanto bisogna dire che tecnologie analoghe provenienti da Paesi diversi possono contenere materiali costitutivi diversi in percentuali differenti, a causa delle diverse tipologie di brevetti utilizzati nella costruzione dei pannelli (IRENA, 2016). Per quanto riguarda, invece, la percentuale di riciclabilità delle sostanze, anche qui, differenti metodi di riciclaggio raggiungono risultati differenti. Vale la pena ricordare che alcuni elementi sono presenti in percentuali molto basse. L'opportunità del loro recupero a fine vita del pannello fotovoltaico che li contiene dipenderà, quindi, non solo dalla possibilità tecnica di metterlo in atto, ma anche dal costo/beneficio del processo, in termini non solo ambientali ma anche economici. È questo un aspetto che va approfondito su casi reali, relativi ai diversi metodi di riciclaggio messi in atto, cosa, questa, che non rientrava negli obiettivi del presente lavoro.

Per quanto riguarda l'individuazione dei principali percorsi di mobilizzazione dei componenti e dei materiali presenti nei pannelli (**punto 3**), si è scelto di analizzare l'aspetto della possibile lisciviazione di sostanze, seguendo l'esempio di IRENA (2016), BIO Intelligence Service (2011) e di Tammaro *et al.* (2016). Quest'ultimo lavoro è stato particolarmente interessante, in quanto contenente un raffronto tra lisciviazione delle diverse sostanze contenute in pannelli c-Si e in pannelli TF, confrontato con i limiti dell'attuale legislazione europea e nazionale. Una prima valutazione che può essere fatta dall'analisi delle tabelle è che, se anche la presenza degli elementi chimici risulta in alcuni casi inferiore ai limiti di legge, non è detto che questa sia pari a zero. Va tenuto conto, inoltre, che la metodologia utilizzata da Tammaro *et al.* (2016) riporta dati di lisciviazione riferibili a situazioni estemporanee, con una esposizione dei frammenti di pannelli per una durata di 24 h. I quantitativi di sostanza ( $\mu\text{g/L}$ ) individuati, devono quindi essere riferiti a questo arco temporale. Nel caso che pannelli non integri dovessero essere abbandonati nell'ambiente per durate temporali maggiori, non si può escludere che i quantitativi di sostanze aumentino, fino a giungere, potenzialmente, al rilascio del 100% delle sostanze pericolose contenute o, comunque, fino a giungere al superamento dei limiti di legge.

L'analisi della potenziale lisciviazione ( $\mu\text{g/L}$ ) di elementi pericolosi dai pannelli fotovoltaici a fine vita (**punto 4**), a seguito di: a) abbandono tal quale nell'ambiente (modalità NF = Non Filtrato); b) conferimento tal quale in discarica (modalità F = Filtrato), ha permesso di cominciare a definire, i possibili scenari relativi al fine vita. Per quanto riguarda i pannelli c-Si, il maggior pericolo di dispersione riguarda il Piombo (non filtrato e filtrato), l'Alluminio (non filtrato e filtrato), lo Stagno, il Manganese, il Bario e l'Argento non filtrati. Per quanto riguarda i pannelli TF, si nota la maggiore dispersione di Alluminio e Molibdeno non filtrati, seguiti da Molibdeno e Manganese filtrati, Cadmio e Zinco non filtrato. Più preoccupanti le quantità di elementi provenienti, in generale, dalle situazioni non filtrate. Diminuisce, tuttavia, la pericolosità relativa alla dispersione del Piombo, mentre resta elevata quella relativa all'Alluminio. Questo ultimo dato è particolarmente interessante, in quanto la maggior parte dell'Alluminio presente nei pannelli riguarda la cornice esterna, che viene separata manualmente dalle celle, e si ritiene, in genere, che l'alluminio possa essere riciclato al 100%. I dati ottenuti, invece, dimostrano che un inquinamento da Alluminio non solo è presente, ma rappresenta anche uno dei rischi più elevati nella fase di fine vita della tecnologia del

fotovoltaico. Questa analisi ha inoltre permesso di stabilire il diverso comportamento delle sostanze in relazione al fenomeno della lisciviazione, in condizioni non controllate (NF) o parzialmente controllate (F), aprendo la strada agli approfondimenti successivi del lavoro.

L'individuazione dei quattro scenari di emissione al 2050 (**WS; I-I; I-II e BS**) di alcuni degli elementi chimici contenuti nei pannelli c-Si e TF (Cadmio, al Cromo, al Piombo e al Nichel) (**punto 5**), ha permesso di approfondire gli aspetti legati all'impatto ambientale e sulla salute del fine vita dei pannelli fotovoltaici. Indipendentemente alla convenienza economica del recupero a fini di riutilizzo degli elementi analizzati (che in questo lavoro non è stata affrontata), si è visto come il BS permetta al 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. Solo nel caso del Cromo in relazione alla tecnologia c-Si e del Piombo in relazione alla tecnologia TF, i dati dicono che lo scenario BS risulta paragonabile all'I-I, contrariamente a quanto ci si potrebbe aspettare. Questo dato testimonia del fatto che sia il cromo che il piombo siano abbattibili nel lisciviato mediante l'utilizzo di opportuni metodi di filtrazione, oltre che attraverso un riciclaggio diretto delle componenti contenenti piombo.

Per quanto riguarda i quattro scenari ipotizzati al **punto 6**, si è riusciti a confrontare tra loro la tecnologia c-Si e la tecnologia TF dal punto di vista della lisciviazione.

Per quanto riguarda il Cromo e il Cadmio, sebbene le emissioni previste per la tecnologia TF risultino superiori a quelle della tecnologia c-Si, esse possono essere tenute utilmente sotto controllo prevedendo uno scenario di riciclaggio al 90%, che risulta essere di livello paragonabile con le emissioni della tecnologia c-Si.

La situazione relativa alla lisciviazione del Cadmio nei quattro scenari per le due tecnologie considerate è invece abbastanza diversa. Dal punto di vista del BS, le due tecnologie quasi si equivalgono, seguite, per entrambi, dallo scenario I-I. Il WS, invece, risulta assolutamente meno favorevole per la tecnologia c-Si.

Gli scenari relativi al piombo, invece, testimoniano di una lisciviazione pressoché pari allo zero per la tecnologia TF. Particolare attenzione, allora, bisognerà porre nel trattamento e riciclaggio del Piombo relativo ai pannelli fotovoltaici a fine vita di tecnologia c-Si. Abbastanza buoni, comunque, i risultati dello scenario BS relativo al Piombo proveniente dai pannelli c-Si.

## Conclusioni

Il fine vita dei pannelli fotovoltaici è un processo complesso che coinvolge una filiera di operazioni specialistiche (raccolta, trasporto, trattamento, dismissione).

Il presente lavoro ha inteso indagare il possibile impatto ambientale e sulla salute umana del fine vita dei pannelli fotovoltaici, nella considerazione dell'elevata quantità di materiale fotovoltaico che giungerà a dismissione entro il 2050.

Si è cercato, quindi, di definire, partendo dai dati presenti in letteratura, la possibile dimensione del fenomeno da qui all'anno 2050, tenendo presente che la vita media di un impianto fotovoltaico si aggira, a tutt'oggi, sui 25-30 anni.

La legislazione attualmente vigente accomuna i pannelli fotovoltaici al RAEE, e ne prevede, quindi, lo smaltimento attraverso procedure codificate che si vanno sempre più definendo. Il riciclaggio del materiale fotovoltaico, tuttavia, come d'altronde quello di tutti gli altri materiali, dipende dal rapporto costo/beneficio tra le procedure di raccolta, trattamento, riciclaggio e smaltimento e la resa in termini produttivi dei materiali recuperati/riciclati. L'ammodernamento degli impianti fotovoltaici esistenti (revamping) è sicuramente meno costoso di un'installazione *ex novo*. Il revamping di impianti fotovoltaici può avere, quindi, un impatto economico rilevante in special modo per taluni impianti professionali, dove il finanziamento per la gestione del fine vita di apparecchiature e moduli può giocare un ruolo cruciale. Non c'è dubbio che avvicinarsi agli obiettivi di decarbonizzazione al 2030 significhi preservare e usare meglio l'esistente piuttosto che realizzare nuovi impianti. Per fare interventi di "revamping" e "repowering" occorrono però chiare regole e una semplificazione dei procedimenti autorizzativi, oltre che per il mantenimento degli incentivi, ridefinizione delle normative e autorizzazioni locali per l'uso delle aree asservite, e un forte coordinamento per adeguare la rete a ricevere la potenza incrementale. È tutt'ora oggetto di studio la valutazione economica di impianti "ex novo" e di "revamping e repowering".

Nel caso dal rapporto costi/benefici non emerga una convenienza economica nel recupero e riciclo del materiale fotovoltaico, è possibile che i materiali raccolti possano finire tal quali in discarica. Come il presente lavoro evidenzia nell'analisi dei diversi scenari ipotizzati, dal punto di vista dell'impatto sull'ambiente e sulla salute, quello dello smaltimento in discarica tal quale non è il migliore scenario possibile, ma, tutto sommato, nemmeno il peggiore. Sarebbe infatti molto peggio se gli impianti fotovoltaici venissero semplicemente "dimenticati" sui luoghi di installazione, lasciati in balia degli agenti atmosferici e delle rotture casuali, per evitare i costi relativi alla rimozione e smaltimento.

La lunga vita degli impianti fotovoltaici (25-30 anni di esercizio) fa in modo che sia altamente probabile che chi ha installato l'impianto non ne curi anche la dismissione. Questo arco di tempo, tuttavia, ci permette di cercare e individuare le migliori procedure e tecnologie per affrontare il fine vita di queste nuove tecnologie, prima di dover materialmente affrontare l'onda di materiale fotovoltaico in dismissione. È bene non perdere l'occasione per tentare di ottimizzare queste procedure, che non si focalizzi solo sui benefici indubbi e

garantiti dallo sfruttamento di una fonte rinnovabile e pulita, ma concentri gli studi e la regolamentazione sullo smaltimento imponente del prossimo futuro. Una tecnologia davvero verde deve essere in grado di raggiungere i principi fondanti la sostenibilità, oltre a quella energetica, quella economica, ambientale e sociale.

## BIBLIOGRAFIA

Barbucci R., Sabatini A., Dapporto P., *Tavola periodica e proprietà degli elementi*, Firenze, Edizioni V. Morelli, 1998.

Bekkelund K., *A Comparative Life Cycle Assessment of PV Solar Systems*, Master Thesis, Department of Energy and Process Engineering – Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2013. [https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/235329/654872\\_FULLTEXT01.pdf?sequence=1](https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/235329/654872_FULLTEXT01.pdf?sequence=1)

BIO Intelligence Service, *Study on Photovoltaic Panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE Directive*, Final Report, EC – DG ENV, ENV.G.4/FRA/2007/0067, 2011. <https://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/Study%20on%20PVs%20Bio%20final.pdf>

Blakemore J.S., *Semiconducting and other major properties of gallium arsenide*, J. Appl. Phys., 53, 1982, p. R123. <https://doi.org/10.1063/1.331665>

Bombach E., Wambach K., Müller A., Röver I., *Recycling of solar cells and modules – recent improvements*, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, 2005.

Borgese F., *Gli elementi della tavola periodica. Rinvenimento, proprietà, usi. Prontuario chimico, fisico, geologico*, Roma, CISU, 1993.

Cucchiella F., D'Adamo I., Rosa P., *End-of-Life of used photovoltaic modules: a financial analysis*, Renew. Sustain. Energy Rev., 47, 2015, pp. 552-561. [10.1016/j.rser.2015.03.076](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.076)

D'Adamo I., Miliacca M., Rosa P., *Economic feasibility for recycling of waste crystalline silicon photovoltaic modules*, Int. J. Photoenergy, 2017, pp. 1-6. [10.1155/2017/4184676](https://doi.org/10.1155/2017/4184676)

de Wild-Scholten M.J. & Alsema E.A., *Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production*, Presented at Materials Research Society Fall 2005 Meeting, Boston, USA, 2005.

Environment Canada, Natural Resources Canada's CanmeENERGY, *Assessment of the environmental performance of solar photovoltaic technologies*, A report funded under the Clean Energy Fund, 2012.

European Union, Legislative Decree n. 49/2014 – photovoltaic panels classified as “RAEE” n.d.

FIRE, *Guida al fine vita degli impianti fotovoltaici*, 2018. <http://fire-italia.org/wp-content/uploads/2014/03/Guida-al-fine-vita-degli-impianti-fotovoltaici.pdf>

Fthenakis V.M., *End-of-life management and recycling of PV modules*, Energy Policy, 28, 2000, pp. 1051-1058. [10.1016/S0301-4215\(00\)00091-4](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00091-4)

Fthenakis V. & Alsema E., *Photovoltaics Energy Payback Times, Greenhouse Gas Emissions and External Costs: 2004–early 2005 Status*, Prog. Photovolt: Res. Appl., 14, 2006, pp. 275–280.

Fthenakis, V.M., Wang, W., *Extraction and separation, of Cd and Te from cadmium telluride photovoltaic manufacturing scrap*, Prog. Photovolt: Res. Appl. 4, 2006, pp. 363–371.

Gustafsson, A.M.K., Foreman, M.R.St.J., Ekberg, C., *Recycling of high purity selenium from CIGS solar cell waste materials*, Waste Manage., 34, 2014, pp. 1775–1782.

- IEA - PVPS, *End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies*, 2018.
- IRENA and IEA-PVPS, *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels*, 2016.
- Jung B., Park J., Seo D., Park N., *Sustainable System for Raw-Metal Recovery from Crystalline Silicon Solar Panels: From noble-metal extraction to Lead Removal*, ACS Sustainable Chem. Eng., 4, 2016, pp. 4079–4083. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00894>
- Latunussa C.E., Ardenne F., Blengini G.A., Mancini L., *Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 156, 2016, pp. 101–111. (CrossRef)
- Malandrino O., Sica D., Testa M., Supino S., *Policies and measures for sustainable management of solar panel end-of-life in Italy*, Sustainability, 9, 2017, p. 481. [10.3390/su9040481](https://doi.org/10.3390/su9040481)
- Marchioro S., *Vantaggi economici derivanti dal processo di riciclaggio di moduli fotovoltaici*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, Anno Accademico 2011-2012, 2012.
- Müller A., Wambach K., Alsema E. A., *Life Cycle Analysis of a Solar Module Recycling Process*, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 2005.
- Nugent D., Sovacool B.K., *Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey*, Energy Policy, 65, 2014, pp. 229-244.
- Padoan F.C.S.M., Altimari P., Pagnanelli F., *Recycling end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development*, Solar Energy, 177, 2019, pp. 746-761.
- Paiano A., *Photovoltaic waste assessment in Italy*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, 2015, pp. 99–112.
- Petrangelo S., *Fotovoltaico sostenibile: la gestione e il riciclo dei moduli a fine vita*, Tesi di Laurea, Università di Bologna, 2011. [https://amslaurea.unibo.it/3280/1/Petrangelo\\_Saverio\\_Tesi.pdf](https://amslaurea.unibo.it/3280/1/Petrangelo_Saverio_Tesi.pdf)
- Sica D., Malandrino O., Supino S., Testa M., Lucchetti M.C., *Management of end-of-life panels as a step towards a circular economy*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 2018, pp. 2934-2945.
- Sinha P., Heath G., Wade A., Komoto K., *Human health risk assessment methods for PV, Part 2: Breakage risks*, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-15:2019. ISBN 978-3-906042-87-9, 2019. [http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/technical/Task\\_12-Human\\_Health\\_Risk\\_Assessment\\_Methods\\_for\\_PV\\_part\\_2.pdf](http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/technical/Task_12-Human_Health_Risk_Assessment_Methods_for_PV_part_2.pdf)
- Tammaro M., Salluzzo A., Manzo S., Privato C., *Impatto ambientale dei rifiuti fotovoltaici*, Energia Ambiente Innovazione, 2–3, 2014, pp. 33–40.
- Tammaro M., Rimauro J., Fiandra V., Salluzzo A., *Thermal treatment of waste photovoltaic module for recovery and recycling: experimental assessment of the presence of metals in the gas emissions and in the ashes*, Renew. Energ., 81, 2015, pp. 103–112.
- Tammaro M., Salluzzo A., Rimauro J., Schiavo S., Manzo S., *Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels*, Journal of Hazardous Materials, 306, 2016, pp. 395–405.
- Wambach K., *Recycling of PV Modules*, 1st International Conference on Module Recycling, Berlin, 2010.



## SITOGRAFIA

[https://www.researchgate.net/publication/324727201\\_Task\\_12\\_End\\_of\\_life\\_management\\_solar\\_photovoltaic\\_panels](https://www.researchgate.net/publication/324727201_Task_12_End_of_life_management_solar_photovoltaic_panels)

[Google Scholar](#)

<http://www.salute.gov.it>

<https://www.efsa.europa.eu/it>

<https://www.lenntech.it>

IFA – GESTIS Database <http://gestis->

[en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis\\_en/000000.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$vid=gestiseng:sdbeng\\$3.0](http://gestis-en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/000000.xml?f=templates$fn=default.htm$vid=gestiseng:sdbeng$3.0)

ENEA  
Servizio Promozione e Comunicazione  
[www.enea.it](http://www.enea.it)

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati  
maggio 2020