



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
DIPARTIMENTO SCIENZE DELLA VITA E DELL'AMBIENTE**

**Corso di Laurea Magistrale in:
Rischio Ambientale e Protezione Civile**

**ANALISI DI SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE DI RICICLO E
SMALTIMENTO DI PANNELLI FOTOVOLTAICI A FINE
VITA**

**ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY ANALYSIS OF
RECYCLING AND DISPOSAL OF PHOTOVOLTAIC PANELS
AT END OF LIFE**

Tesi di Laurea Magistrale di:

Andrea Sturbini

Relatore:

Prof.ssa Francesca Beolchini

Correlatore:

Prof.ssa Alessia Amato

Sessione Straordinaria: Febbraio 2022

Anno Accademico 2020 - 2021

Indice

1.Introduzione.....	3
1.1 Diffusione del fotovoltaico in Italia.....	3
1.2 Riferimenti Legislativi.....	5
1.3 Il recupero e il riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita.....	8
2. Scopo del lavoro.....	26
3. Materiali e Metodi.....	27
4. Risultati e Discussione.....	31
4.1 Analisi di Processo.....	31
4.2 Analisi di Sostenibilità Ambientale.....	35
5. Conclusioni.....	49
6. Bibliografia e Sitografia.....	50
7. Allegato.....	54

1. Introduzione

1.1 Diffusione del fotovoltaico in Italia

Negli ultimi anni, la progressiva riduzione dei costi della tecnologia e il conseguente aumento dell'efficienza delle celle fotovoltaiche hanno determinato un notevole incremento delle installazioni di impianti fotovoltaici a livello mondiale.

Alla fine del 2019 la capacità fotovoltaica cumulativa installata a livello globale ammontava a oltre 600 GW.

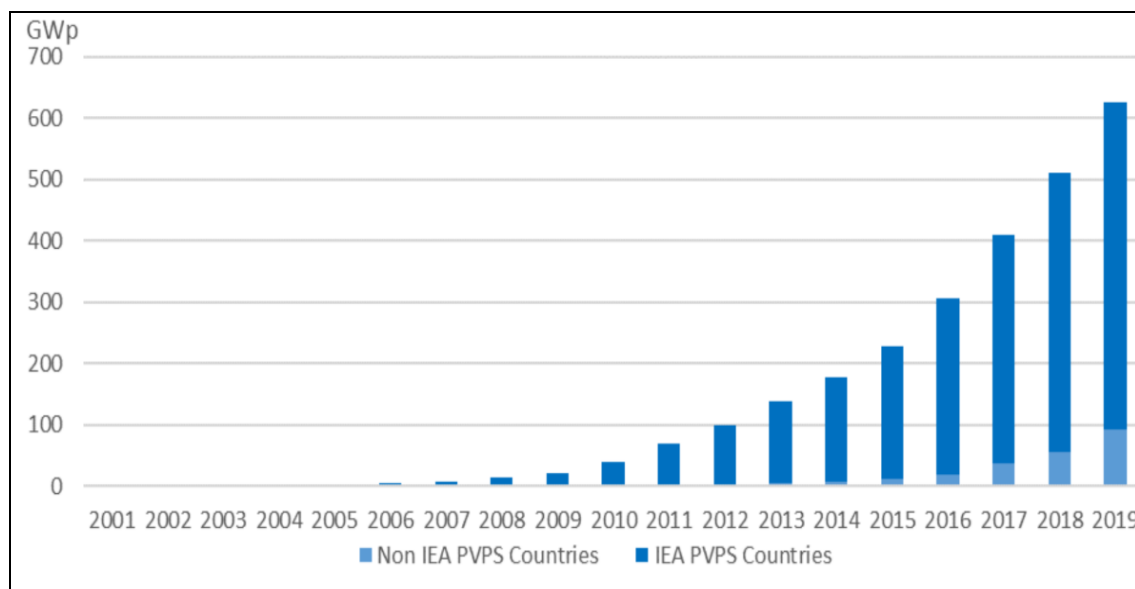


Figura 1.1- Capacità fotovoltaica cumulativa installata a livello globale a fine 2019

In Italia, dopo il boom delle installazioni del fotovoltaico del periodo 2010-2014 e la conclusione del sistema di incentivazioni, il trend di installazioni è rallentato, sebbene vengano già realizzati impianti utility scale in regime di market parity.

Il crescente numero di installazioni mette in evidenza il tema della gestione dei rifiuti derivanti da moduli fotovoltaici a fine vita.

In Italia, ipotizzando una vita utile dei moduli pari a 20 anni, i moduli da smaltire al 2033 (20 anni dopo il picco di installazioni) potrebbero ammontare a circa 18 GW: quindi circa 1,44 Mln di tonnellate di moduli.

È bene ricordare che la vita utile dei pannelli può arrivare anche a 30 anni; a 20 anni scade la garanzia del costruttore per una diminuzione complessiva della potenza generata pari al 20%.

Va subito chiarito che tali moduli saranno da avviare al riciclo come da regolamentazioni in vigore e non da smaltire in discarica, come erroneamente si potrebbe pensare. Se poi si ipotizza di avviare a riciclo 50 GW di moduli fotovoltaici nel 2050, i moduli da smaltire sarebbero circa 2,8 Mln di tonnellate. Rif. (P. Carrabba, L.M. Padovani).

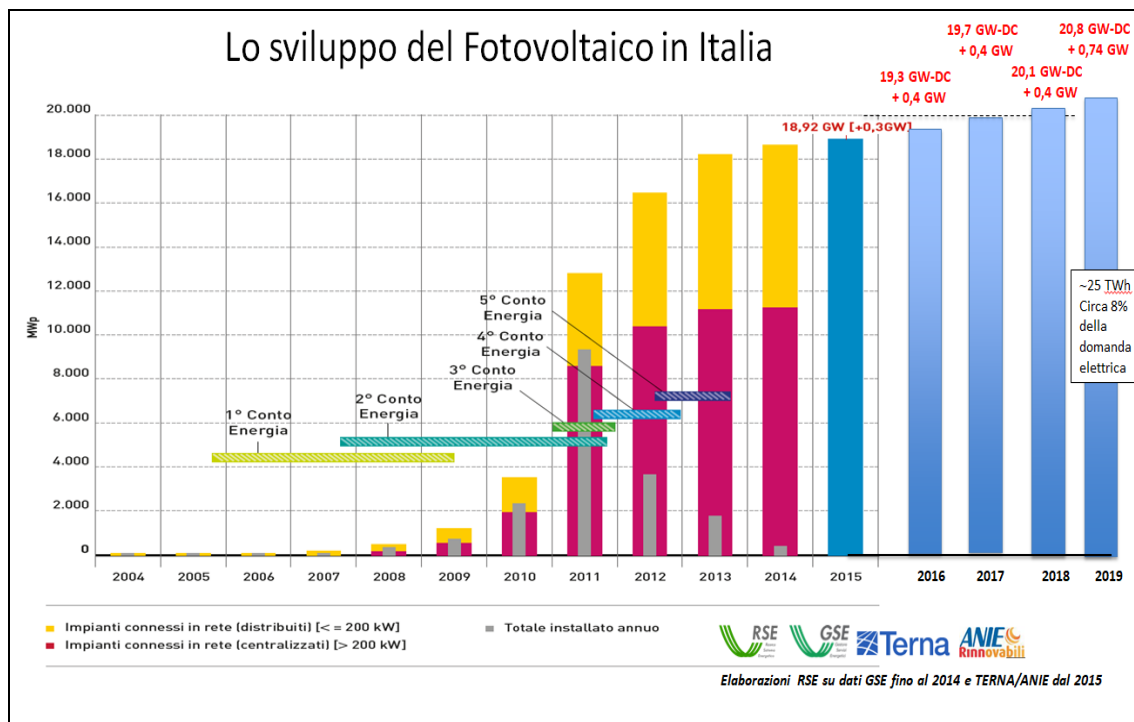


Figura 1.2 – Capacità fotovoltaica cumulativa installata in Italia a fine 2019 e incremento annuale

1.2 Riferimenti legislativi

Con il Decreto Legislativo n. 49 del 14.03.2014 “Attuazione della direttiva 2012/19/UE sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE)” in Italia si è estesa la regolamentazione a tutti i moduli fotovoltaici installati o da installare.

La regolamentazione del recupero e riciclo dei moduli a fine vita, è stata disciplinata dal GSE ovvero il Gestore dei servizi energetici alla quale è attribuito l'incarico di promozione e sviluppo delle fonti rinnovabili e dell'efficienza energetica, in collaborazione con RSE, e con il coinvolgimento di vari operatori (Costruttori, Installatori e Consorzi di trattamento di rifiuti), ha emesso nel Dicembre 2012 il Disciplinare Tecnico per “Definizione e verifica dei requisiti dei Sistemi o Consorzi per il recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita”.

In base al Disciplinare del GSE, sono responsabili dell'invio al riciclo dei moduli, in sequenza di responsabilità, i Produttori / Importatori o i Distributori o gli Installatori e, in caso di loro assenza, il Soggetto Responsabile dell'impianto in cui i moduli sono installati.

I pannelli fotovoltaici, come già anticipato, rientrano nell'ambito di applicazione dei RAEE (Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettrodomestici) la cui gestione è oggi disciplinata dalla Direttiva 2012/19/EU, recepita in Italia dal D.lgs. n. 49 del 14 marzo 2014.

Il decreto introduce specifiche disposizioni per quanto riguarda i pannelli fotovoltaici installati su impianti incentivati in Conto Energia, attribuendo determinate responsabilità in carico al GSE.

Prima della pubblicazione del D.lgs. n. 49/2014, per gli impianti incentivati ai sensi dei Decreti Ministeriali 5 maggio 2011 e 5 luglio 2012 è stata pre-vista l'adesione del produttore dei moduli fotovoltaici a un Sistema Collettivo/Consorzio che garantisca la completa gestione a fine vita dei moduli fotovoltaici immessi sul mercato.

Per gli impianti incentivati in Conto Energia sono attive due modalità di gestione distinte in funzione della data di entrata in esercizio, tipologia di impianto e Conto Energia di appartenenza:

- 1) la prima segue le disposizioni del D.lgs. n. 49 del 14 marzo 2014;
- 2) la seconda segue le disposizioni del Disciplinare Tecnico pubblicato dal GSE per gli impianti incentivati ai sensi del quarto e quinto Conto Energia.

L'obiettivo della disciplina è quello di garantire il finanziamento delle operazioni di raccolta, trasporto, trattamento adeguato, recupero e smaltimento ambientalmente compatibile dei rifiuti derivanti da pannelli fotovoltaici.

Le disposizioni del D.lgs. 49/2014 interessano gli impianti fotovoltaici incentivati in Conto Energia come di seguito specificato:

I Conto Energia (D.M. 28 luglio 2005 e D.M. 06 febbraio 2006);

II Conto Energia (D.M. 19 febbraio 2007);

III Conto Energia (D.M. 06 agosto 2010);

IV Conto Energia: impianti entrati in esercizio fino al 30 giugno 2012 e tutti gli impianti rientranti nel Titolo IV - impianti a concentrazione (D.M. 05 maggio 2011);

V Conto Energia: impianti fotovoltaici integrati con caratteristiche innovative e impianti a concentrazione (D.M. 05 luglio 2012) e definiscono che sia il GSE a trattenere una quota finalizzata a garantire la copertura dei costi di gestione a fine vita dei rifiuti prodotti dai pannelli fotovoltaici.

Tale quota differisce in funzione della fattispecie degli impianti: impianti domestici (impianti di potenza nominale inferiore a 10 kW), una quota pari a 12 €/pannello una tantum nel quindicesimo anno di incentivazione; impianti professionali (impianti di potenza nominale superiore o uguale a 10 kW), una quota pari a 10 €/pannello a partire dall'undicesimo anno di incentivazione e per dieci anni.

Per i beneficiari del quarto e del quinto Conto Energia che non rientrano nel perimetro descritto dalle Istruzioni operative ai sensi del D.lgs. 49/2014, valgono le regole definite all'interno dei decreti di riferimento, ai sensi dei quali, il GSE ha pubblicato nel mese di dicembre 2012, un Disciplinare Tecnico che riporta la definizione e verifica dei requisiti dei Sistemi o consorzi per il recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita in attuazione delle regole applicative per il riconoscimento delle tariffe incentivanti.

Il D.Lgs. 49/2014 indica che i responsabili della gestione dei RAEE sono i Produttori/Distributori delle apparecchiature stesse, proporzionalmente alla quantità dei nuovi prodotti immessi sul mercato, attraverso

l'organizzazione e il finanziamento di sistemi di raccolta, trasporto, trattamento e recupero ambientalmente compatibile dei rifiuti.

In particolare, il Produttore di moduli fotovoltaici si iscrive al Registro Nazionale dei Soggetti obbligati al finanziamento dei sistemi di gestione RAEE e indica il Consorzio di riciclo a cui aderisce. Successivamente, il finanziamento del RAEE – fotovoltaico viene effettuato secondo la casistica indicata nello stesso D.lgs.

Rif. (Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche RAEE Istruzioni operative per la gestione e lo smaltimento dei pannelli fotovoltaici incentivati, 2021), www.gse.it

1.3 Il recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita

La Direttiva EU, così come il D.lgs. 49/2014, impone obiettivi ben precisi di recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita.

Nell'allegato V del D.lgs. viene richiesto, in particolare, che siano raggiunti i seguenti limiti minimi applicabili per i RAEE trattati dal 15 agosto 2018:

- 1) preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio del 80% in peso dei moduli gestiti
- 2) recupero del 85% in peso dei moduli gestiti.

Secondo alcuni gestori di Stabilimenti di trattamento i processi di trattamento dei moduli ai fini del riciclo possono essere efficacemente e economicamente attuati a patto che ci sia un volume adeguato di moduli da trattare.

Questa quantità dovrebbe essere superiore a circa 8.000 tonnellate/annue (cioè più di circa 140 MW/anno). Poichè ad oggi queste quantità non sono ancora state raggiunte, i moduli vengono trattati solo parzialmente (cioè solo per le operazioni meno costose) e il resto del rifiuto viene accantonato in attesa che si raggiunga un volume adeguato al trattamento da svolgere. Quindi appare evidente che il problema non è tecnologico ma legato alla quantità.

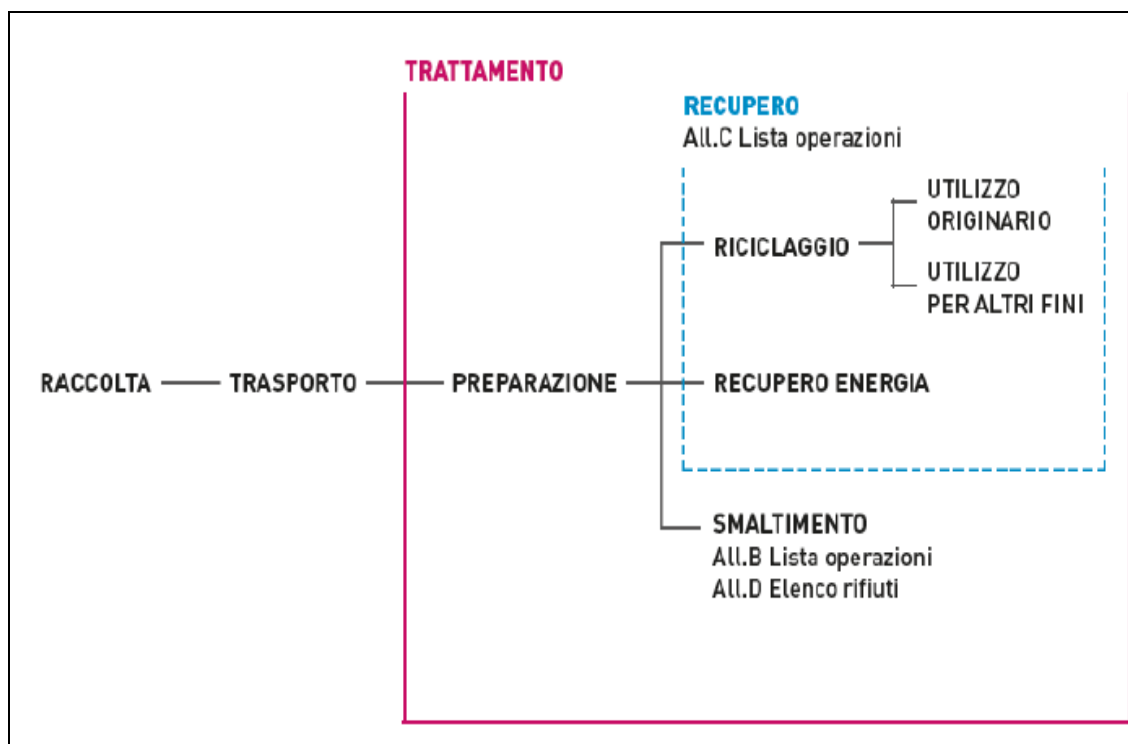


Figura 1.3 -Le fasi di gestione dei rifiuti generati da moduli fotovoltaici a fine vita (D.Lgs. 49/2014)

- I moduli fotovoltaici installati a livello globale sono realizzati per oltre il 90% con celle in Silicio cristallino (c-Si); i restanti 10% sono realizzati con tecnologie a film sottili di vario genere (principalmente CdTe, Silicio amorfo, CIGS). Rif. Sito ufficiale GSE.

1.3.1 Composizione e Tipologie di Moduli Fotovoltaici

I moduli con tecnologia in c-Si hanno tipicamente una struttura multistrato composta da:

- 1) vetro frontale, temperato (spesso circa 4 mm)
- 2) pellicola di EVA (Etil Vinil Acetato) posta nel fronte e nel retro della matrice di celle
- 3) matrice di celle di silicio con dimensioni variabili dai 100 ai 150 mm, dotate di strato antiriflettente e dei contatti elettrici necessari a raccogliere la corrente elettrica prodotta;
- 4) collegamenti elettrici (rame) che connettono le celle in serie;
- 5) strato posteriore, realizzato generalmente con un foglio di Tedlar bianco (0,35 mm) o in alcuni casi in vetro;
- 6) cornice in alluminio anodizzato anticorrosione (circa 10% in peso);
- 7) scatola di giunzione (junction box), installata sul retro, completa di cavi e di diodi di bypass.

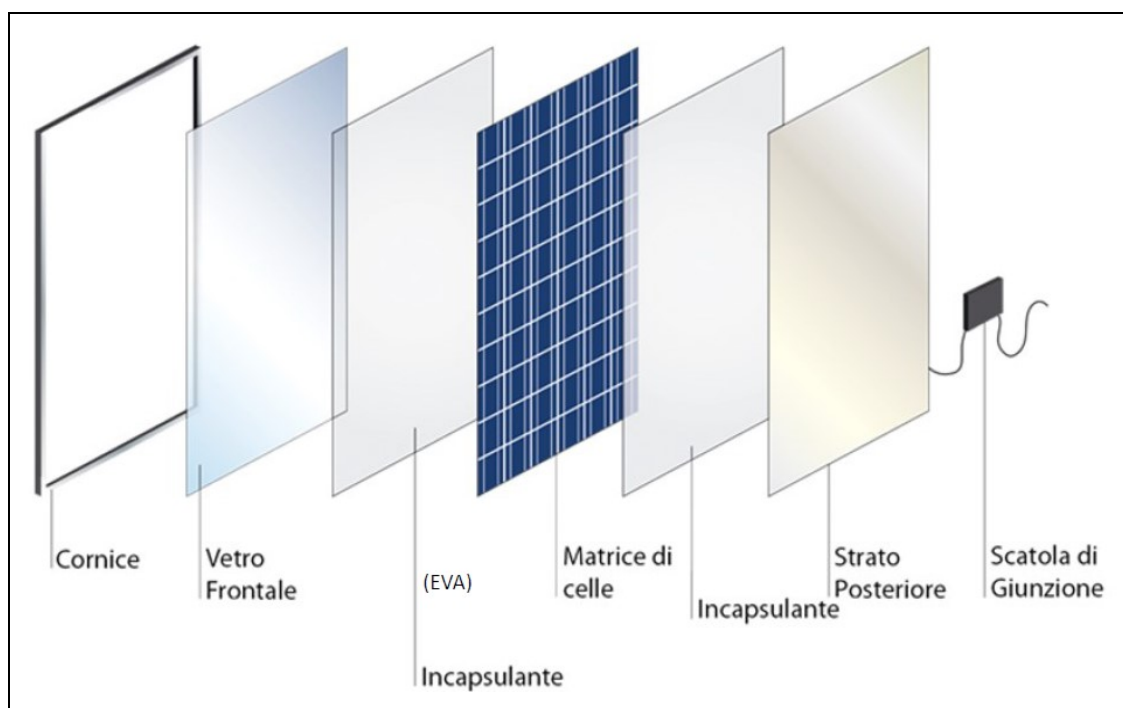


Figura 1.4 - Composizione di un modulo FV in Silicio Cristallino

I vari strati vengono sigillati fra loro attraverso un processo di laminazione, che consiste nel riscaldamento sottovuoto dei moduli fino a 140 °C, necessari a fondere l'EVA.

Questo procedimento assicura che gli strati siano sigillati senza bolle d'aria all'interno onde evitare dispersioni di calore.

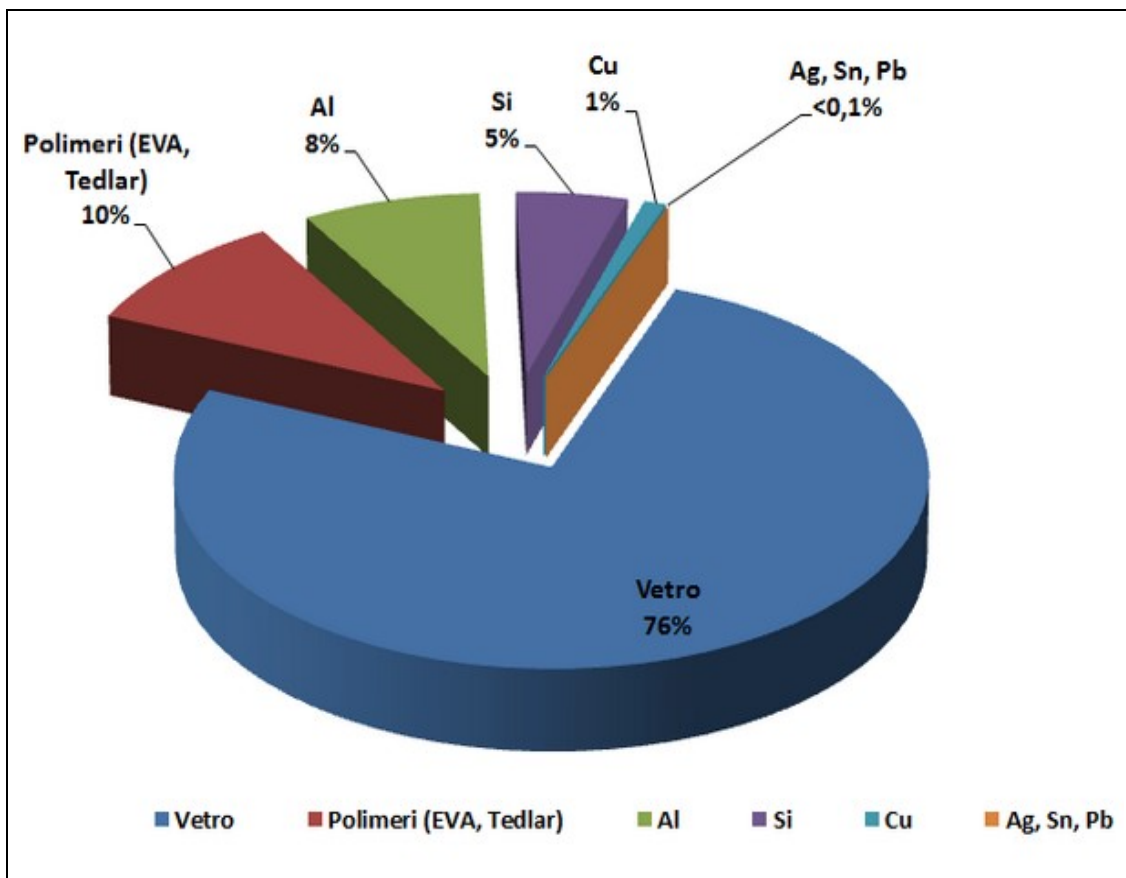


Figura 1.5 – Composizione del modulo FV in c-Si

Tramite le diverse fasi di trattamento, è possibile recuperare materiali quali vetro (a seconda del metodo applicato si può ottenere anche vetro bianco ad elevata purezza), rame, alluminio, silicio (può essere recuperato per produrre nuove celle solari o essere utilizzato in siderurgia), e polimeri derivanti dalle materie plastiche.

Questi non sono considerati elementi il cui recupero pone dei problemi ambientali.

Tuttavia, la presenza di altri elementi quali l'argento e il piombo potrebbe essere oggetto di criticità da un punto di vista ambientale, se si considerano le attuali metodologie di trattamento ancora in fase preindustriale.

È da notare comunque che l'impiego di questi elementi è limitato (<0.1%) e, secondo i nuovi trend al 2030, il loro utilizzo sarà ulteriormente ridotto nella produzione dei moduli fotovoltaici, anche per quanto riguarda i moduli in CdTe.

La forte competitività del c-Si nel mercato grazie al continuo aumento della sua efficienza energetica arrivando fino al 14,7% per il fotovoltaico poli-cristallino e al 18% per i pannelli fotovoltaici monocristallini, ed al suo costo in continua diminuzione, ha reso difficile competere per le altre tecnologie.

Tuttavia, nonostante l'elevato livello di efficienza di questa tecnologia fotovoltaica di prima generazione, sono utilizzate attualmente utilizzati altri tipi di moduli fotovoltaici:

Film sottili

Le tecnologie a film sottile sono spesso indicate come fotovoltaico solare di seconda generazione. I materiali semiconduttori utilizzati per produrre celle a film sottile hanno uno spessore di pochi micrometri.

Queste tecnologie generalmente comprendono due famiglie principali:

- a base di silicio film sottile (silicio amorfo (a-Si) e micromorfo (a-Si / c-Si));
- non a base di silicio (tellururo di cadmio (CdTe) e diseleniuro di rame-indio-gallio (CIGS)).

Queste tecnologie possono essere più economiche per produrre, in quanto tali vengono distribuiti su scala commerciale, ma storicamente hanno avuto livelli di efficienza inferiori.

La tecnologia a film sottile per la generazione di energia su larga scala ha acquisito importanza intorno al 2006, quando il costo del silicio è aumentato a causa dell'aumento della domanda.

I moduli a film sottile, quindi, avevano un senso più economico nonostante la loro bassa efficienza.

Tuttavia, dal 2012, visto il calo dei prezzi del silicio, combinato con il calo dei prezzi dei moduli silicio cristallino ad alta efficienza, ha spostato la produzione verso la tecnologia di prima generazione del medesimo.

Mentre il fotovoltaico di prima generazione a base di silicio cristallino ha quindi consolidato il suo status commerciale in seguito ai miglioramenti delle prestazioni e alla riduzione dei costi negli ultimi anni, la quota di mercato complessiva delle tecnologie a film sottile è in costante diminuzione dal 2012. Attualmente, la tecnologia a film sottile rappresenta solo il 5% del mercato solare fotovoltaico globale, mentre i moduli solari a base di silicio continuano a detenere circa il 95% del mercato globale dei moduli fotovoltaici

- Tecnologie a film sottile non a base di silicio

➤ Celle al diseleniuro di rame, indio e gallio (CIGS)

Le celle CIGS hanno raggiunto livelli di efficienza elevati (22,9%) paragonabili al silicio cristallino commerciale.

Tuttavia, la produzione di celle CIGS può essere difficile a causa della rarità dell'indio, nonché della complessa stechiometria e delle fasi multiple per produrli, limitando la produzione su larga scala a breve termine.

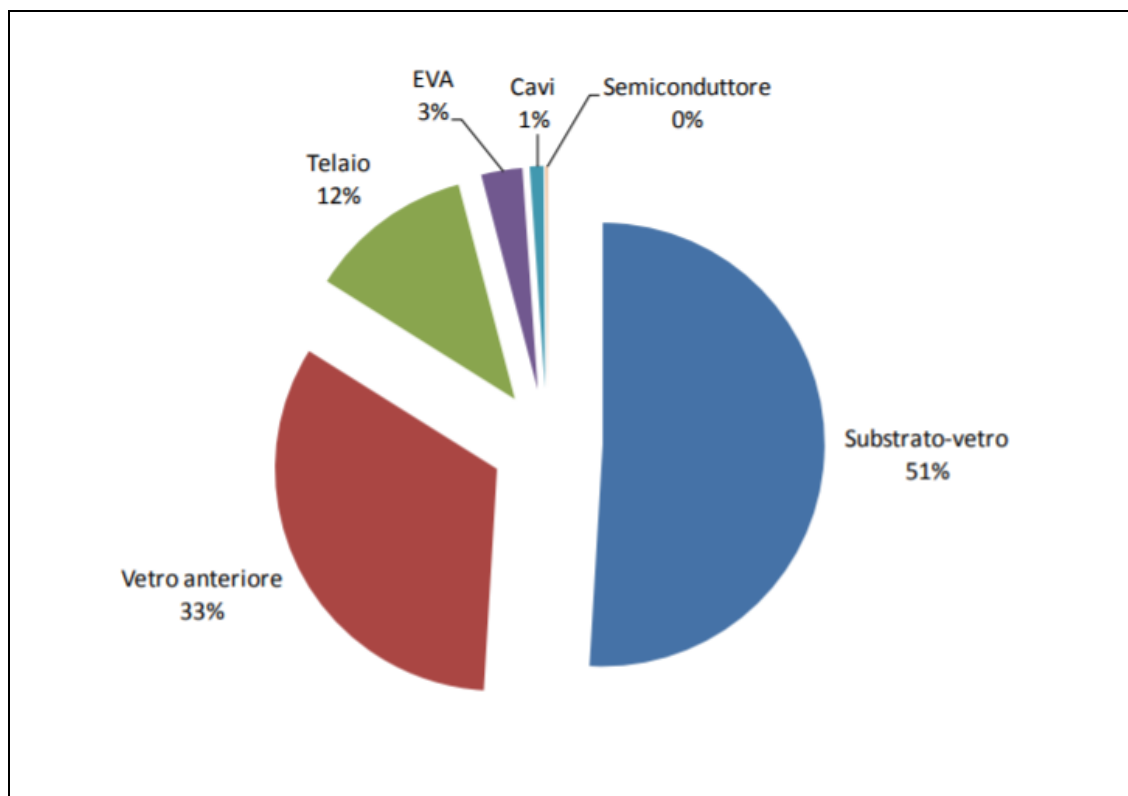


Fig. 1.6 Composizione di un pannello fotovoltaico al diseleniuro di rame, indio e gallio (CIGS)

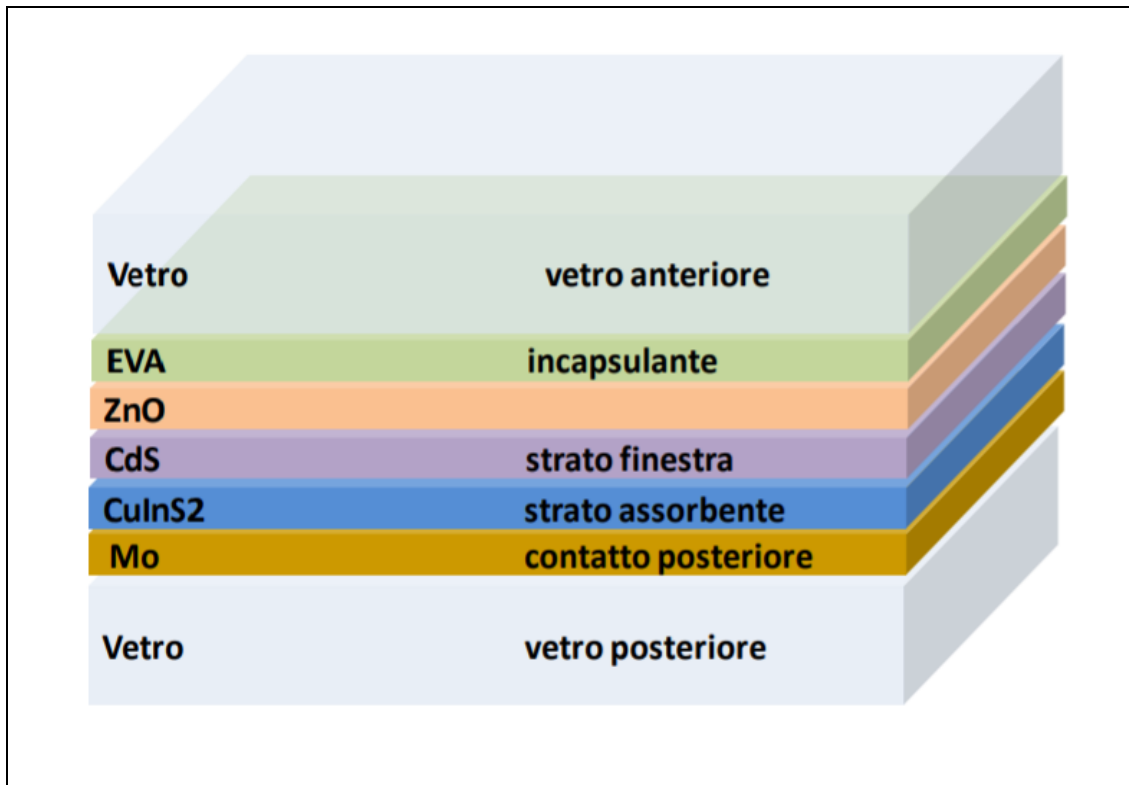


Fig.1.7 Sezione verticale di un pannello fotovoltaico al diseleniuro di rame, indio e gallio (CIGS)

- Celle al tellururo di cadmio (CdTe)

Le celle al tellururo di cadmio hanno raggiunto un'efficienza del 21%, molto simile al CIGS, e sono caratterizzate da un buon assorbimento e basse perdite di energia. Le celle solari CdTe sono realizzate a bassa temperatura, il che rende la loro produzione molto flessibile e conveniente.

Il CdTe detiene attualmente la quota di mercato maggiore di tutte le tecnologie a film sottile. L'unica problematica di quest'ultima tecnologia potrebbe risultare essere solamente la questione del contenuto al loro interno di una sostanza altamente pericolosa per l'uomo ed inquinante per l'ambiente: il Cadmio.

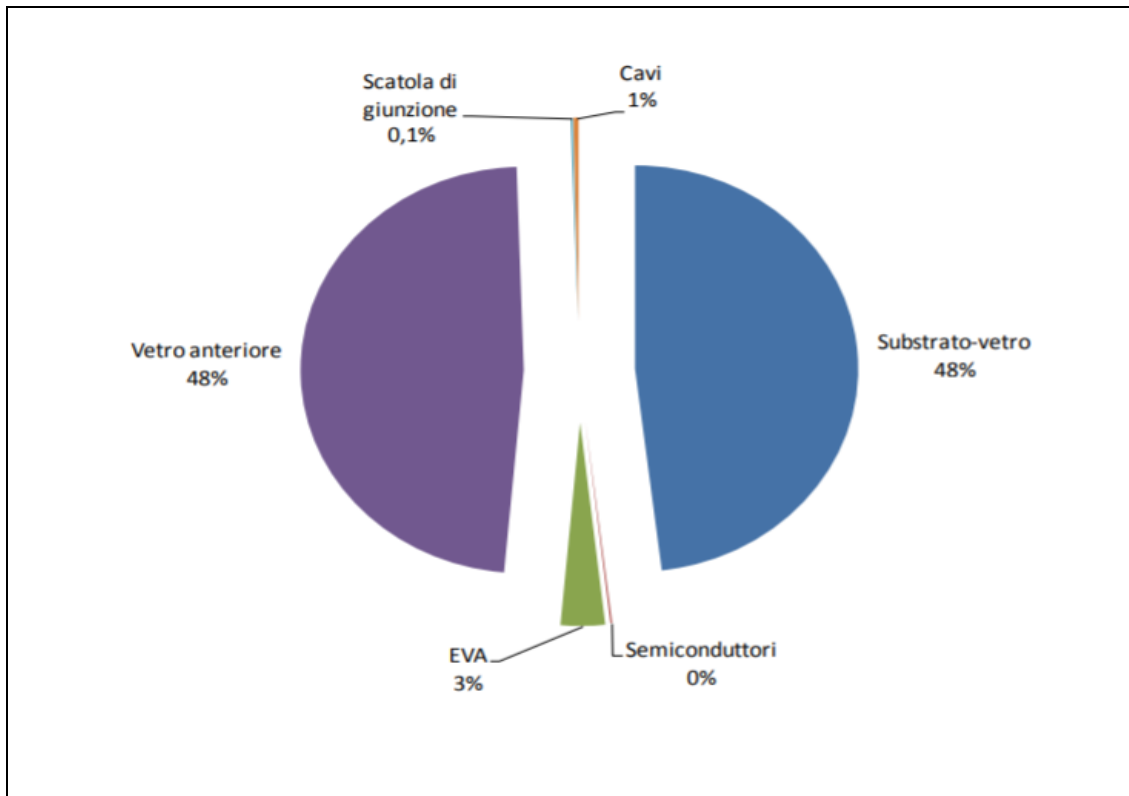


Fig.1.8 *Composizione di un pannello fotovoltaico al tellururo di cadmio (CdTe)*

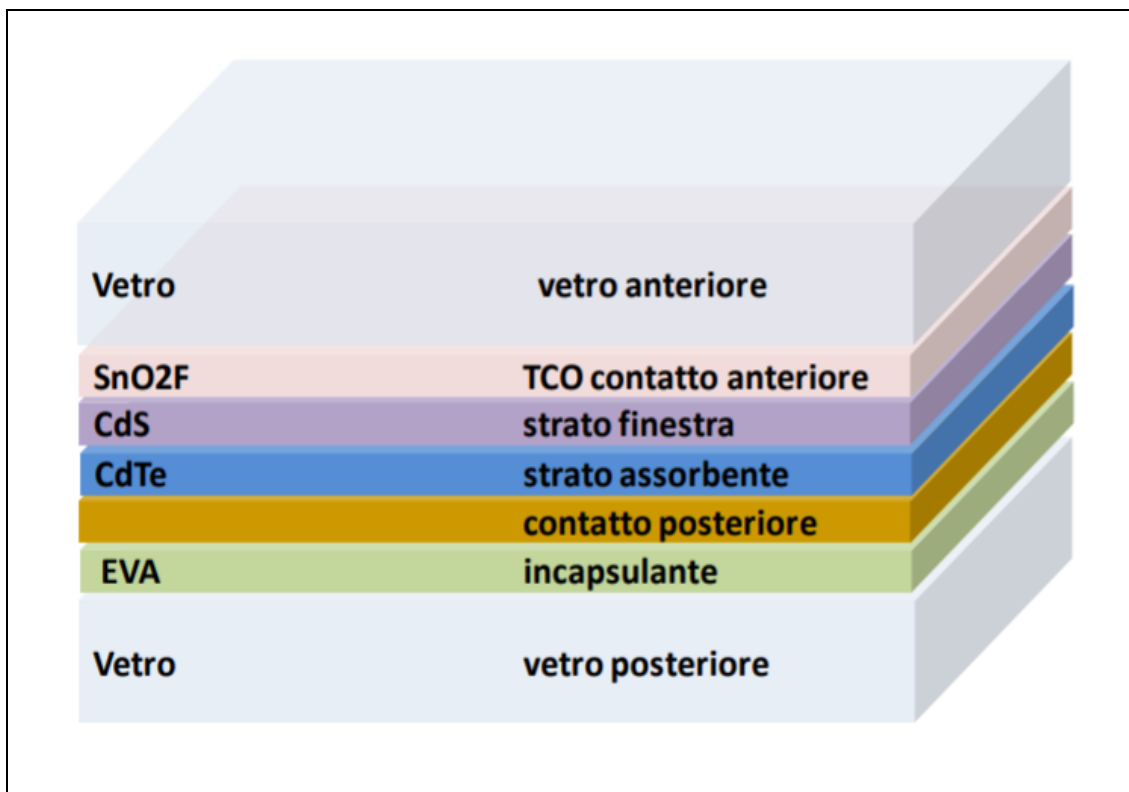


Fig.1.9 *Sezione verticale di un pannello fotovoltaico al tellururo di cadmio (CdTe)*

Rif. (Sito ufficiale Regione Lombardia)

- **Le nuove frontiere: la perovskite**

La perovskite è un minerale di biossido di titanio di calcio. Il minerale è stato scoperto nel 1839 da Gustav Rose sui Monti Urali in Russia e prende il nome dal mineralogista russo Lev Perovski.

Questo materiale ha una struttura cristallina molto particolare ed è un ottimo conduttore, caratteristica sfruttabile nel campo delle energie rinnovabili.

Secondo gli studi scientifici condotti da Annamaria Petrozza, ricercatrice presso il “Center for Nano Science and Technology” (Cnst) dell'Istituto Italiano di Tecnologia (Iit) di Milano, ed Henry Snaith, ricercatore dell'Università di Oxford, con questo materiale si riescono a creare celle solari ibride con un rendimento superiore del 15% rispetto a quello attuale. Con la perovskite si entra dunque in un fotovoltaico di nuova generazione. Le attuali celle fotovoltaiche in silicio hanno alti costi di produzione e un complesso processo di lavorazione per la costruzione di pannelli fotovoltaici. Questi costi si riducono notevolmente con la perovskite, i cui materiali attivi sono disponibili in abbondanza e che è più semplice da lavorare.

Inoltre la perovskite reagisce a diverse lunghezze d'onda della luce, e questo permette di convertire più energia solare in elettricità.

La perovskite è flessibile e semi-trasparente: questo è estremamente interessante anche in vista di applicazioni del fotovoltaico sulle facciate degli edifici.

Numerosi ricercatori sono concentrati sulle celle fotovoltaiche in perovskite. Alcuni centri di ricerca, come il Lawrence Berkeley National

Laboratory (LBNL) che sta lavorando insieme all'Università di Berkeley (California), dimostrano una concreta efficienza operativa: secondo il LBNL, questa è addirittura pari al 21,7%.

Si pensa che la perovskite possa addirittura mettere fuori dai giochi il silicio: l'efficienza delle celle solari di dispositivi che usano la perovskite è cresciuta dal 3,8% del 2009 al 22,1% dei primi mesi del 2016.

Ciò fa della perovskite, nell'ambito delle energie rinnovabili, la scoperta di più veloce avanzamento.

Restano da chiarire alcuni dubbi, come ad esempio l'effettiva durata delle celle solari in perovskite, il grado di deterioramento in situazioni di umidità e la presenza nelle celle di perovskite di sostanze tossiche come il piombo.

Uno dei principali è la durata.

Poiché i cristalli si dissolvono facilmente, non sono in grado di sopportare condizioni di umidità e devono essere protetti dall'umidità attraverso l'incapsulamento, ad esempio attraverso uno strato di ossido di alluminio o lastre di vetro sigillate.

Attualmente la maggior parte delle celle solari sono realizzate in silicio; tuttavia, un'area da tenere d'occhio è lo sviluppo di nuovi materiali per celle solari. In particolare, uno dei materiali più promettenti è la perovskite, un tipo di minerale molto efficiente ad assorbire la luce.

I primi dispositivi fotovoltaici in perovskite nel 2009 hanno convertito solo il 3,8% dell'energia contenuta nella luce solare in elettricità.

Tuttavia, poiché i cristalli sono molto facili da realizzare in laboratorio, le loro prestazioni sono state rapidamente migliorate e nel 2018 la loro

efficienza era salita al 24,2%, stabilita dai ricercatori negli Stati Uniti e nella Repubblica di Corea, vicino al record di laboratorio del silicio del 26,7%.

Un'altra sfida per gli scienziati è che, pur essendo stati in grado di raggiungere livelli di alta efficienza con piccole perovskiti, non sono stati in grado di replicare tale effetto con aree più grandi.

Se queste barriere potranno essere superate, le celle di perovskite hanno il potenziale per cambiare la dinamica e l'economia dell'energia solare perché sono più economiche da produrre rispetto alle celle solari e possono essere prodotte a temperature relativamente basse, a differenza del silicio. Rif. (IRENA-Future of Solar PV 2019).

1.3.2 Fasi di trattamento dei moduli

Attualmente, le tecniche di trattamento dei moduli per effettuare il riciclo sono alquanto varie e tutte in fase di sperimentazioni preindustriali, giacché si cerca ancora di ottimizzarle per renderle adattabili alla gestione di volumi significativi di rifiuti.

D'altronde la sperimentazione su ampia scala non è stata ancora possibile dato il numero sinora esiguo di moduli avviati al riciclo a fine vita.

Tuttavia, se si vogliono analizzare le fasi di riciclo dei moduli fotovoltaici attualmente adottate, si può fare riferimento a quelle indicate da RSE.

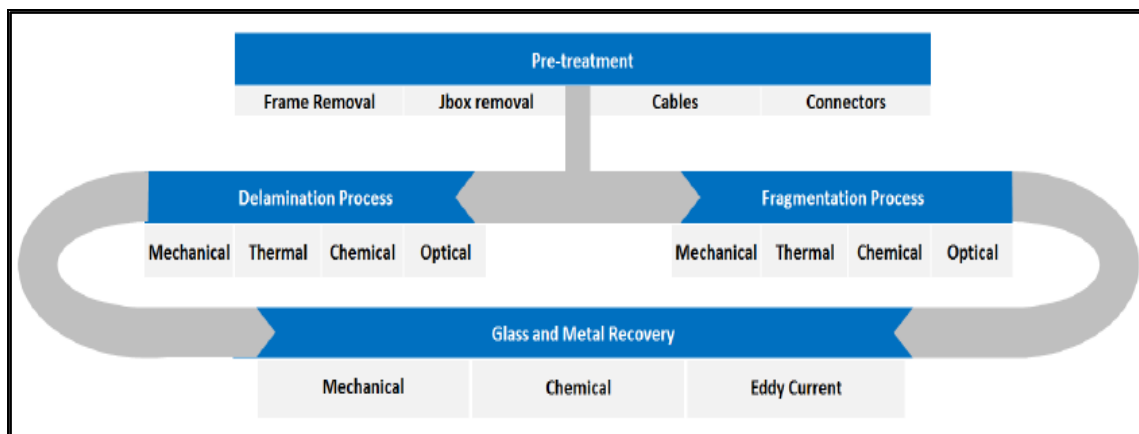


Figura 1.10 - Il processo di riciclo dei moduli FV in c-Si può essere suddiviso in tre fasi principali: a) pretrattamento, b) delaminazione, frammentazione, c) recupero

Riguardo ai processi di trattamento, la delaminazione consente una separazione più accurata dei componenti del modulo (il che può portare a un riciclaggio più efficiente e redditizio).

Attualmente la triturazione o frammentazione può essere eseguita senza importanti investimenti, poiché la rottura dei moduli fotovoltaici e la separazione dei materiali può essere effettuata, nella maggior parte dei casi, da impianti esistenti di riciclaggio o smaltimento dei rifiuti.

Generalmente la fase di triturazione, per i moduli in Silicio cristallino, avviene sotto aspirazione e quindi le emissioni vengono convogliate in apposito sistema di abbattimento (filtro a maniche) e successivamente inviate a camino.

Le frazioni di materiali così trattati consentono di riciclare e reintrodurre in successive lavorazioni il 99,70% del campione, mentre il restante 0,3% può essere destinato a smaltimento secondo le norme vigenti.

Il residuo (circa 0,3%) contenente vetro-silicio-altro è attualmente fonte di differenti valutazioni.

Tale residuo necessita in certi casi di un'ulteriore lavorazione per ottenere un vetro meno inquinato e per poter essere effettivamente riutilizzato, anche se la maggior parte dei gestori degli stabilimenti di trattamento ritengono che possa essere venduto senza trattamenti aggiuntivi.

Un ulteriore aspetto da considerare è il fattore economia di scala: infatti solo la lavorazione di grandi quantità di moduli può giustificare elevati investimenti (soprattutto nel caso dei metodi di delaminazione) e costi di trasporto.

È un dato di fatto che attualmente il riciclo dei moduli in cristalli di silicio non è economicamente praticabile.

Secondo la stima riportata in recenti articoli, la dimensione minima dell'impianto che rende il processo economicamente sostenibile è di circa 7.000 t/anno di moduli fotovoltaici silicio cristallino, anche se alcuni autori riportano cifre fino a 20.000 t/anno.

Entro una decina di anni in Italia si potrebbe raggiungere la quota minima di rifiuti da moduli fotovoltaici per rendere il processo di recupero e riciclo economicamente sostenibile. Rif. (Regione Lombardia).

1.3.3 Tecnologie innovative di riciclo dei pannelli fotovoltaici

La Tab. 1.1 presenta in maniera schematica i principali articoli scientifici della letteratura recente (2018-2021) sullo stato dell'arte attuale per quanto riguarda le migliori tecnologie e processi per il riciclo delle materie prime fondamentali e strategiche contenute nelle differenti tipologie di pannelli fotovoltaici.

Per il riciclo dei pannelli fotovoltaici si elencano i seguenti processi:

- Processi meccanici, termici e metallurgici come descritto dagli articoli riportati in tabella come raffinazioni per ossidazione, per evaporazione e con solvente (Xin et al.,2019), (Punathil et al., 2021), (Rubino et al.,2020);
- Processi nei quali si opera lo smantellamento manuale di infissi in alluminio, e trattamento meccanico di riduzione dimensionale con trattamento fisico del fresato (Dos Santos et al.,2021), (Singh et al.2021);
- Processi con uso di solventi e liscivianti (Eshraghi et al. 2020), (Pagnanelli et al.2019), (Chung et al.,2021), (Amato et al.,2019);
- processi che sfruttano la pirolisi (Bogust et al.,2020), (Bogacka et al.,2020), (Wang et al. 2019);
- Processi che utilizzano tecnologie che impiegano la tensione pulsata ad alta frequenza, per avere una separazione sempre più efficiente dei materiali costituenti il pannello fotovoltaico. (Tokoro et al.,2020), (Lim et al.2021),(Yue Fan et al.2020).

Tab. 1.1 Articoli scientifici relativi a tecnologie innovative di riciclo dei pannelli fotovoltaici

Scala	Tipologia Pannelli	Materiali Recuperati	Tecnologia	Efficienza	Bibliografia
Pilota	Silicio Policristallino	alluminio, boro, berillio, calcio, gadolinio, afnio, uranio, ittrio e zirconio e rimozione di antimonio, bismuto, carbonio, piombo, magnesio e fosforo,	raffinazioni metallurgiche più tipiche processi: raffinazione per ossidazione, raffinazione per evaporazione e raffinazione con solvente	98% Silicio purezza	Xin et al. (2019)

Lab.	Silicio monocristallino e policristallino	silicio, alluminio, argento e piombo	trattamento sequenziale con tre diversi prodotti chimici.	99.998%	Lineesh Punathil et al.(2021)
Lab.	Silicio monocristallino e policristallino	Silicio, Piombo, Argento, Alluminio	nanodimensionamento tramite percorsi di fresatura scalabili industrialmente per soddisfare i requisiti di anodi di Si tolleranti all'espansione per LIB.	99%	Eshraghi et al.(2020)
Lab.	Silicio monocristallino e policristallino	Silicio e Ag, Al, Au, B, Be, Bi, C, Ca, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Gd, Ge, Hf, In, La, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, Os, Pb	immersione in azoto liquido, mentre il l'incapsulante viene rimosso mediante pirolisi.	86% di riciclo recupero dell'88%.	Bogust et al. (2020)
Lab.	Silicio monocristallino e policristallino	(Si),(Ag), (Al), (Cu), (Ga) (Pb) (Cd),	Il legante di poli(etilene-co-vinil) acetato (EVA) è stato rimosso mediante processo di pirolisi alla temperatura di 500 C;	non disponibile	Wang et al. (2019)
Lab.	Silicio monocristallino e policristallino	(Si, Ag, Al, Pb, Cu e Fe)	è stato possibile solubilizzare il 100% dell'argento contenuto nelle celle fotovoltaiche utilizzando i parametri ottimali	recupero del 99,98% dell'argento presente nelle celle fotovoltaiche.	de Oliveira et al. (2020)
Pilota	Silicio monocristallino e policristallino	Riciclaggio ad alta efficienza di scarti di vetro di pregio, Si, Al e Cu.	Trattamento meccanico tramite setacci vibranti. Trattamento con solventi su scala pilota e separazione dei polimeri e riciclaggio dei metalli	riciclaggio dell'82%, tasso di recupero del 94%,	Rubino et al. (2020)
Pilota	Al Silicio monocristallino, CdTe- e CIGS	Al, Ag	smantellamento manuale di infissi in alluminio, trattamento meccanico di riduzione dimensionale	80-85%	Dos Santos Martins Padoan et al. 2021
Lab.	Silicio monocristallino e policristallino	(Ag), (Cu), (Al), (Si) e vetro	Questo metodo ha impiegato una tecnologia di potenza pulsata	95,6% del Cu totale e il 17,2% del	Tokoro et al. (2020)

				totale Ag nel campione	
Lab.	Silicio monocristallino e policristallino	(Ag) e etilene-vinilacetato (EVA).	Utilizzo di una scarica pulsata ad alta tensione per separare l'argento (Ag) dagli altri componenti	Tasso di recupero dell'Ag del 69%	Lim et al. (2021)
Lab.	Silicio monocristallino e policristallino	Non disponibile	Tensione pulsata prodotto dal generatore di impulsi con frequenza impostata su 1Hz	Non disponibile	Yue Fan et al. (2020)
Lab.	Silicio monocristallino e policristallino	Non disponibile	Risultati della pirolisi e Separazione termica	Non disponibile	Bogacka et al.(2020)

Tab. 1.2 Articoli scientifici relativi a studi di sostenibilità ambientale di processi di riciclo di pannelli fotovoltaici

Scala	Tipologia Pannelli	Materiali Recuperati	Tecnologia	Efficienza	Settore Riuso	Bibliografia
Pilota	Silicio policristallino	Silicio, alluminio, rame, vetro, argento e vetro.	un LCA dettagliata sviluppata all'interno del progetto ReSiELP	Non disponibile	l'analisi LCA ha mostrato che il processo indagato è favorevole all'ambiente	Ansanelli et al. (2021)
Lab.	Silicio monocristallino e policristallino	Silicio, vetro, alluminio	riciclaggio del vetro laminato impianto (LGRF) e riciclaggio mediante recupero completo.	96% per silicio, vetro e alluminio	Produzione circolare, migliorare efficienza e longevità del pannello	Singh et al. (2021)
Lab.	(CIGS) seleniuro di rame indio gallio	Ga,In, Cu	Utilizzo di agenti liscivianti (H ₂ SO ₄ , HCl, HNO ₃ , acido citrico e NaOH).	efficienze superiori al 90%	Non disponibile	Amato et al. (2019)
Pilota	Silicio policristallino, Si amorfo e CdTe)	vetro	Trattamento meccanico	Non disponibile	Non disponibile	Pagnanelli et al. (2019)

Lab.	Silicio cristallino	Silicio e metalli	Sistema iodio-ioduro è usato come un lisciviante per HNO ₃	Stessa resa se si utilizza HNO ₃	Non disponibile	Chung et al. (2021)
-------------	---------------------	-------------------	---	---	-----------------	---------------------

La Tab.1.2 illustra 6 studi scientifici che utilizzano un approccio innovativo denominato LCA (Life Cycle Assessment), il quale consiste nel valutare tutte le fasi di un determinato processo, traducendo tutti i flussi di entrata ed uscita in impatti ambientali tramite differenti categorie di impatto.

Attraverso lo studio di LCA si individuano le fasi in cui si concentrano maggiormente le criticità ambientali dell'intero ciclo di vita del prodotto/servizio.

In questo modo è possibile proporre interventi migliorativi che abbiano benefici a livello generale, evitando azioni che, agendo su singole fasi, finiscano per trasferire gli impatti da una fase all'altra.

La rilevanza di uno studio LCA applicato a processi di valorizzazione di pannelli fotovoltaici a fine vita è visibile prendendo in considerazione una vita media del pannello di 25 anni, si prevede infatti, che i rifiuti solari fotovoltaici in tutto il mondo raggiungano oltre l'80% (circa 78 milioni di tonnellate) entro il 2050.

Pertanto, lo smaltimento dei pannelli fotovoltaici diventerà una questione ambientale sempre più rilevante nei prossimi decenni.

Infatti, l'aumento del flusso annuo dei pannelli fotovoltaici a fine vita ha imposto lo sviluppo di strategie di riciclaggio efficaci per raggiungere gli obiettivi della regolamentazione dell'UE; vale a dire 80% di riciclaggio ed 85% di recupero a partire dall'agosto 2018.

2.Scopo del lavoro

L'obiettivo principale della presente Tesi è la valutazione dell'impatto ambientale di processi innovativi per il riciclo di pannelli fotovoltaici a fine vita. Il raggiungimento di tale scopo ha richiesto diverse attività:

- Effettuare ricerche nella letteratura più recente per individuare le strategie più idonee per il riciclaggio dei pannelli fotovoltaici;
- Effettuare l'analisi di processo su tali tecnologie in modo da quantificare la richiesta di materie prime e di energia e la conseguente produzione di reflui derivanti dai processi di riciclo stessi;
- Effettuare la valutazione dell'impatto ambientale mediante un approccio tipo LCA, quantificando per ogni scenario gli impatti ambientali da essi generati.
- Individuare gli aspetti critici per ognuna delle tecnologie scelte e tra queste selezionare la più idonea dal punto di vista dell'impatto ambientale.

3. Materiali e Metodi

Il metodo LCA è una procedura standardizzata che permette di registrare, quantificare e valutare i danni ambientali connessi con un prodotto, un processo o un servizio, all'interno di un contesto ben preciso, che deve essere definito a priori. La struttura e le richieste dell'LCA sono descritte nella normativa DIN/ISO 14040 e seguenti.

In accordo con queste regolamentazioni, il metodo si divide in quattro parti

Le quattro fasi in cui si articola uno studio di LCA sono:

- 1) Definizione dell'obiettivo: viene definito il contesto dell'indagine, i confini del sistema, e vengono fissate le richieste per le fasi successive e del campo di applicazione, in cui vengono definite le motivazioni, le applicazioni previste (miglioramento del prodotto, marchi ambientali...) ed i destinatari dello studio.
- 2) Analisi dell'inventario: vengono annotati i flussi di materiale ed energia in ingresso e uscita, prendendo in considerazione l'intera vita del prodotto in esame (LCI – Life Cycle Inventory) ovvero una creazione dell'inventario dei dati, ovvero di una lista di tutti i flussi materiali in ingresso e in uscita dalle unità di processo di cui è composto il sistema;
- 3) Stima e valutazione dell'impatto ambientale: riconoscere, riassumere e quantificare i possibili effetti ambientali dei sistemi esaminati (LCIA – Life Cycle Impact Assessment), che prevedono la selezione del metodo di valutazione, l'assegnazione dei risultati di inventario (classificazione), il calcolo dei risultati per gli indicatori di categoria (caratterizzazione), la normalizzazione e la pesatura dei dati stessi.

4) interpretazione dei risultati con relativa stesura del report finale, in cui è prevista la spiegazione del significato che essi assumono e delle restrizioni che pongono, la verifica di completezza, l'analisi di sensitività e consistenza dello studio, col quale è possibile identificare le opzioni di miglioramento.

La prima fase è un passaggio cruciale, in quanto è la fase in cui vengono prese le decisioni più importanti come la definizione del campo di applicazione, cioè il contesto all'interno del quale ci si muove per effettuare lo studio, condizionando così le decisioni da prendere a valle e i risultati ottenuti.

Durante la definizione dell'obiettivo devono essere fissati i fini concreti e gli interessi specifici dello studio LCA, si definiscono poi i confini del sistema che costituiscono l'interfaccia con l'ambiente e con gli altri sistemi di prodotti; essi definiscono anche quali procedure vadano incluse e quali escluse dall'indagine. Allo scopo di ridurre la sua estensione e complessità entro limiti ragionevoli, si pongono dei criteri limite, ovvero delle soglie minime al di sotto delle quali è possibile trascurare un certo flusso di materiale.

Si stabiliscono le procedure di allocazione, che saranno poi usate in fase di inventario, e vengono determinati i benefici (o le funzioni) dei sistemi di prodotti analizzati.

Per quantificare un certo beneficio, è necessario definire un'unità funzionale (ad esempio una tonnellata di prodotto o, nel caso dei moduli FV, il kWh o il m²), che serva da riferimento per tutti i flussi in entrata e in uscita rispetto al sistema e per i potenziali effetti ambientali.

Nell'analisi dell'inventario, i flussi di materiale ed energia vengono annotati minuziosamente, prendendo in considerazione l'intera vita del prodotto in esame.

Essi vengono determinati sulla base delle entrate e delle uscite di ciascun processo parziale, in relazione ai confini del sistema.

Successivamente, connettendo tra loro i vari passaggi analizzati, si riesce a simulare la rete di connessioni che intercorrono tra i moduli e l'ambiente, così da ottenere bilanci di massa e di energia, che diventano l'inventario vero e proprio del sistema.

Tutti i flussi di materiale ed energia che passano i confini vengono annotati quantitativamente, facendo sempre riferimento all'unità funzionale.

Il risultato dell'inventario è una tabella all'interno della quale i vari flussi individuati sono raggruppati in sei categorie principali: materie prime, fonti primarie di energia (rinnovabili e non), rifiuti solidi, emissioni gassose ed emissioni liquide.

La stima dell'impatto ambientale ha come obiettivo la traduzione dell'analisi dell'inventario nelle varie categorie.

Tale stima serve quindi per riconoscere, riassumere e quantificare i possibili effetti ambientali e sulla salute umana derivanti dall'utilizzazione delle risorse e dalle emissioni precedentemente identificate.

L'analisi degli impatti può essere scomposta in diversi passaggi: definizione delle categorie di impatto, classificazione, caratterizzazione e normalizzazione.

Nella classificazione, i flussi di materia ed energia vengono assegnati alle categorie di impatto ambientale. Le categorie di impatto descrivono i potenziali effetti sull'uomo e sull'ambiente; tra le altre cose, esse differiscono in relazione alla loro collocazione spaziale (effetti globali, regionali e locali). Un flusso di materiale può essere assegnato a diversi effetti ambientali.

Nella fase di caratterizzazione i risultati della LCI classificati all'interno di una particolare categoria di impatto, sono ricondotti, con opportuni fattori di conversione, a una comune unità di misura e aggregati per dare un indicatore di impatto della categoria.

Durante la normalizzazione il potenziale d'impatto determinato viene messo in relazione con un valore di riferimento all'interno della stessa area, così da poter confrontare gli indicatori di categoria tra diverse alternative.

Successivamente si procede all'aggregazione dei vari indicatori, assegnando dei pesi a ciascuno di essi, in un unico valore globale di impatto (pesatura).

Per l'analisi di sostenibilità ambientale si è utilizzato il software GABI 9.5, combinato con il database Life Cycle Engineering (compilation 7.3.3.153; DB versione 6.115).

Il metodo utilizzato in questa analisi è l'Environmental FootPrint 3.0.

4. Risultati e Discussione

4.1 Analisi di processo

In questo capitolo viene preso in esame un unico processo di valorizzazione di pannelli fotovoltaici nato dalla fusione di 2 fasi di trattamento degli stessi provenienti dall'analisi della letteratura scientifica presente al Cap. 1.

Tali processi riguardano:

- il trattamento meccanico-elettrico dei pannelli con recupero di vetro, alluminio, argento e wafer di silicio (rif. “Recovery of Silver From Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Cells by Wire Explosion”, 2021, Lim et al.);
- successivo trattamento del wafer per il recupero di silicio nanodimensionato per applicazioni in batterie Litio-ione (LIB) (rif. “Recovery of Nano-Structured Silicon from End-of-Life Photovoltaic Wafers with Value-Added Applications in Lithium-Ion Battery”, 2020. Eshraghi et al.)

Le figure 4.1. e 4.2 mostrano gli schemi a blocchi dei processi considerati.

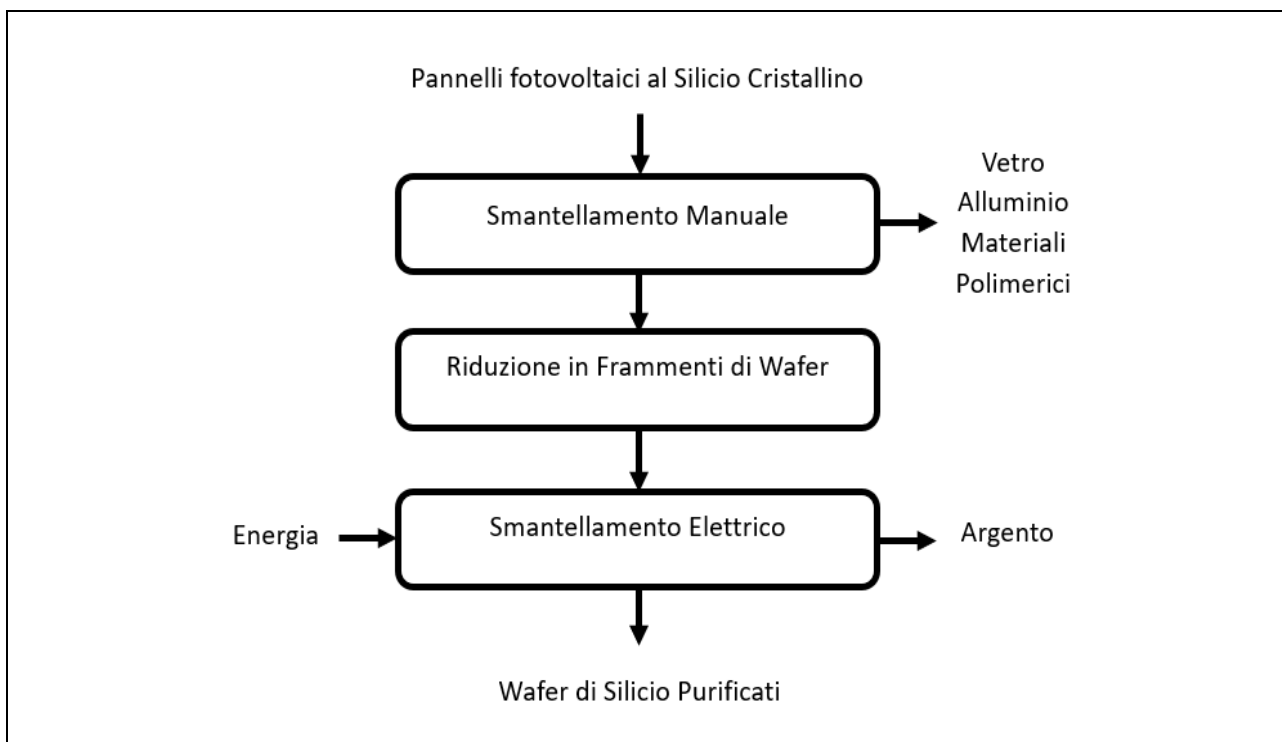


Fig. 4.1 Trattamento meccanico elettrico

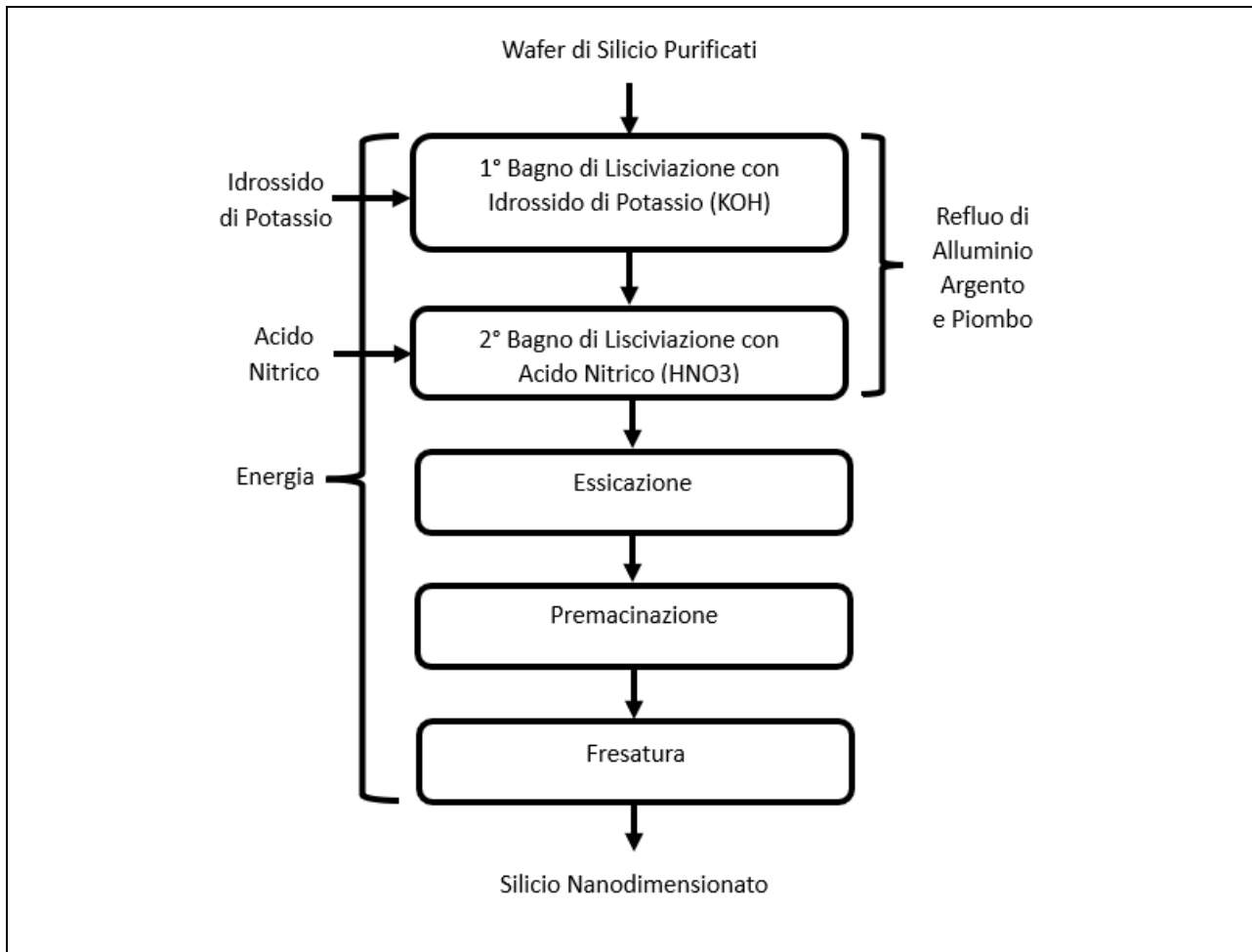


Fig. 4.2 Trattamento dei wafer per il recupero del silicio nanodimensionato

Il trattamento meccanico elettrico in Fig. 4.1 consiste nelle seguenti fasi, tenendo presente l'utilizzo di circa 100 Tonnellate di Pannelli Fotovoltaici al Silicio Cristallino come unità funzionale.

- **Smantellamento manuale.** In questa fase è previsto un trattamento manuale di rimozione dell'involucro del Pannello Fotovoltaico, costituito dalla cornice di alluminio e dalla lastra in vetro temperato spesso circa 4 mm
- **Riduzione in frammenti di wafer.** In questo step viene spezzata la matrice di celle fotovoltaiche in frammenti della dimensione di 15,6 cm per 15,6 cm
- **Smantellamento elettrico.** In questa fase tramite il rilascio istantaneo di una grande quantità di energia elettrica, è possibile separare l'Ag in modo selettivo

con un unico scarico per cella fotovoltaica. Le particelle separate sono state valutate quantitativamente in base al loro recupero.

- **Wafer di Silicio purificati.** In quest'ultimo stadio per quanto riguarda il trattamento meccanico ed elettrico si arriva a wafer di celle fotovoltaiche dove è stata rimossa la maggior parte di metalli pesanti e materiali polimerici per poter successivamente procedere al secondo trattamento

Il trattamento del wafer per il recupero di silicio nanodimensionato in Fig. 4.2 prevede le seguenti fasi:

- **1° Bagno di Lisciviazione.** Utilizzando l'idrossido di Potassio (KOH) 8 molare a 60°C per una durata di 5 minuti. Viene prodotto uno scarto di residui di alluminio
- **2° Bagno di Lisciviazione.** Utilizzando acido nitrico (HNO₃) 8 molare a 80°C per una durata di 15 minuti. Viene prodotto uno scarto di residui di argento e piombo
- **Essiccazione.** In questa fase tutto il materiale proveniente dai 2 bagni liscivianti viene posto in stufa a 120°C
- **Premacinazione.** Qui i wafer di silicio tramite un mulino a sfere a burattura vengono macinate per arrivare ad ottenere dimensioni in particelle di silicio dell'ordine di 125 μm,
- **Fresatura e Nanodimensionamento.** Utilizzando un mulino planetario a sfere da laboratorio per un 1 ora e 40 minuti si ottiene una polvere di silicio nanodi-mensionata che verrà utilizzata come materiale anodico per le batterie agli ioni di litio.

Le tabelle A) e B) mostrano i bilanci di materia e di energia riferiti al trattamento dei pannelli nel processo oggetto di studio. I quantitativi riportati sono riferiti

all'unità funzionale scelta per l'analisi, ovvero 100 tonnellate. (tutti i dettagli per i calcoli effettuati sono riportati nell'allegato).

**Tab. 4.1 Bilanci di materia e di energia dei processi presi in esame
nel presente lavoro di tesi:**

A) Trattamento meccanico-elettrico dei pannelli,

B) Trattamento di recupero di silicio nanodimensionato

A)

IN	OUT
100 t pannelli	76 t lastra di vetro
	8 t alluminio
18000 kWh energia	69 kg di Ag recuperati
	10 t materiali polimerici
	5 t wafer a frammenti

B)

IN	OUT
5 t wafer a frammenti	44,5 m3 di refluo contenente metalli
12 m3 di KOH 8M	5 t kg Si nano dimensionato
7,5 m3 di HNO3 8M	
24 m3 di acqua	
1 t di metalli pesanti	
1500 kWh energia	

4.2 Analisi di Sostenibilità Ambientale

4.2.1 Scopo dell'analisi di sostenibilità con metodo LCA

L'analisi di sostenibilità di seguito descritta ha preso in considerazione due fasi di trattamento di pannelli fotovoltaici derivanti dalla letteratura scientifica relativa alle tecnologie innovative di riciclo e riuso di pannelli fotovoltaici a fine vita provenienti dall'analisi al Cap.1.

Queste due fasi di trattamento sono servite alla creazione di un unico processo di valorizzazione, il quale verrà di seguito preso in esame identificando le fasi critiche dal punto di vista ambientale e successivamente confrontato a livello di impatto ambientale con il processo Photolife (descritto da Pagnanelli et al.,2019 e Rubino et al.,2020) e con il conferimento in Discarica come rappresentato di confini del sistema in Fig.4.3.

Tre tipologie di gestione a confronto

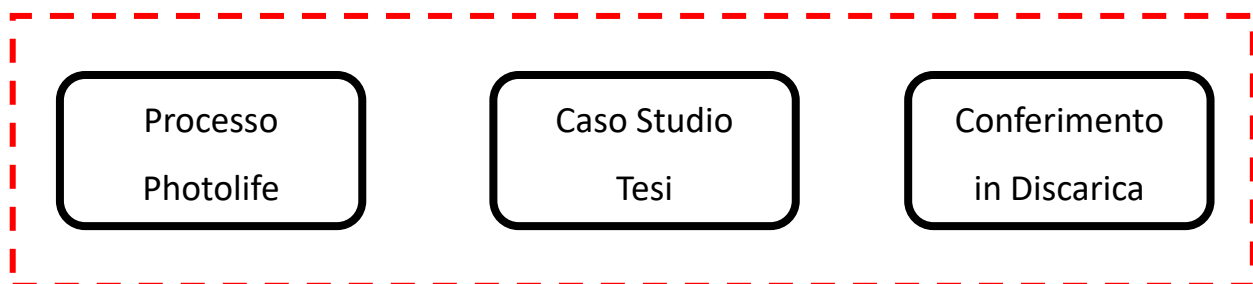


Fig.4.3 Tipologie di gestione a confronto

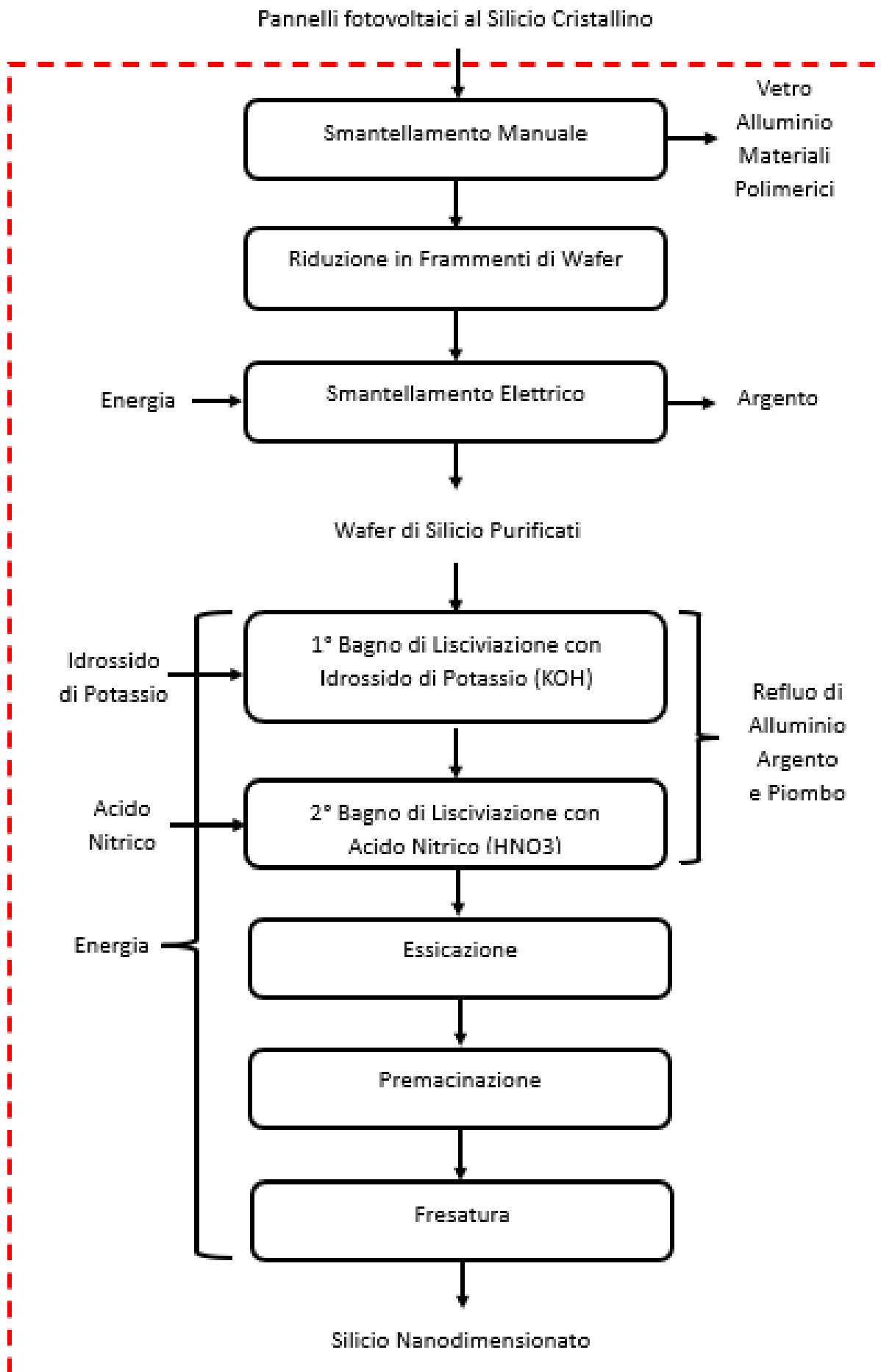


Fig.4.4 Confini del sistema del caso studio

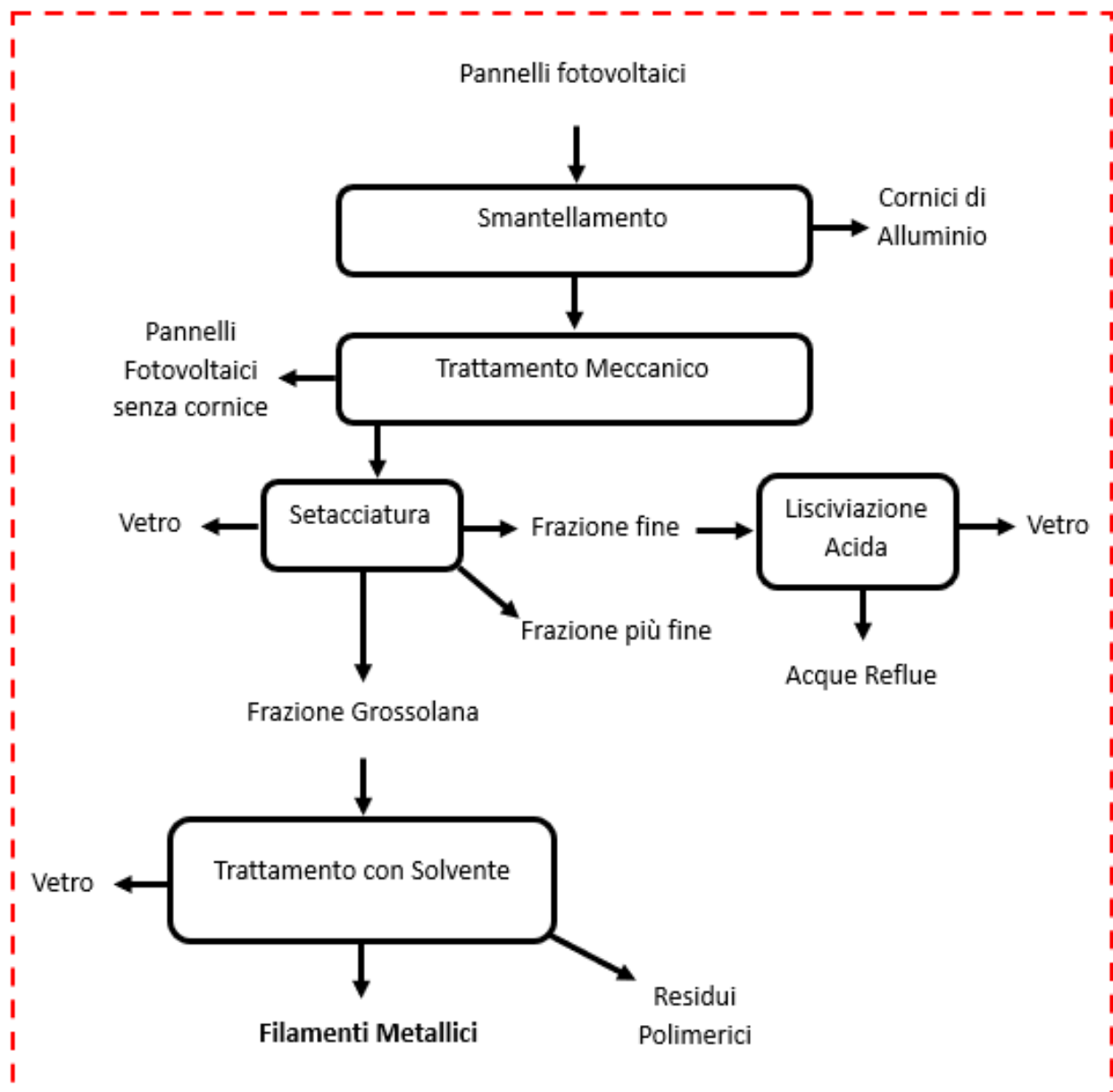


Fig.4.5 Confini del sistema processo Photolife

Nel dettaglio tali processi riguardano il trattamento meccanico-elettrico dei pannelli con recupero di vetro, alluminio, argento e wafer di silicio, e il successivo trattamento dei wafer per il recupero di silicio nanodimensionato per applicazioni in batterie Litio-ione (LIB).

L'Analisi è stata condotta assumendo come confini del sistema quelli descritti dalle figure 4.4 e 4.5. L'unità funzionale scelta è pari a 100 tonnellate pannelli fotovoltaici a fine vita.

Sono state condotte alcune assunzioni di seguito riportate:

1) Viene considerato come nullo il contributo energetico dello smantellamento manuale e trascurabile quello derivante dalla riduzione in frammenti di wafer.

2) Al materiale polimerico è stato associato un credito 0 poiché potenzialmente recuperabile per essere reimmesso in altri cicli produttivi.

3) L'impatto ambientale dell'idrossido di Potassio utilizzato nella 1° Lisciviazione è stato sostituito con quello dell'idrossido di sodio per questioni legate alla disponibilità del dato, tale assunzione è considerata accettabile poiché l'idrossido di sodio consente il raggiungimento delle condizioni di processo necessarie.

4.2.2 Analisi dell'Inventario

In questa fase si sono raccolti i dati di input e output al processo (tabelle A e B), incluse le emissioni nei vari comparti ambientali, stimate con il software Gabi. Le emissioni stimate derivano dalle fasi di processo incluse nei confini del sistema.

4.2.3 Classificazione e caratterizzazione

Nella fase di valutazione degli impatti una volta individuate le diverse categorie d'impatto, sono state classificate. La successiva procedura di caratterizzazione consiste nel quantificare gli impatti ambientali nelle diverse categorie selezionate.

I dati riportati nell'inventario sono stati moltiplicati per un indicatore, ovvero il fattore di caratterizzazione, specifico per una determinata categoria di impatto.

Le categorie di impatto individuate in questo studio sono:

- Acidificazione dell'acqua dolce terrestre
- Cambiamento Climatico
- Effetti cancerogeni sulla salute umana
- Ecotossicità acqua dolce
- Eutrofizzazione delle acque dolci
- Eutrofizzazione marina
- Eutrofizzazione terrestre
- Radiazioni Ionizzanti- Salute umana
- Effetti non cancerogeni sulla salute umana
- Uso del suolo
- Riduzione di Ozono
- Formazione di Ozono Fotochimico-Salute Umana
- Uso delle risorse, energia
- Uso delle risorse, minerali e metalli
- Contaminanti Inorganici effetti sulle vie respiratorie
- Scarsità d'acqua

Dai grafici in Figura 4.6 è possibile notare come ogni fase influenzi l'impatto complessivo dell'intero processo preso in analisi e risulta evidente il beneficio delle differenti frazioni recuperate.

Il processo risulta quindi ambientalmente vantaggioso in tutte le categorie di impatto prese in considerazione.

Il beneficio dei prodotti ottenuti è diverso in base alla specifica categoria. L'argento, ad esempio, rappresenta il principale credito ambientale nelle categorie effetti non cancerogeni sulla salute umana, acidificazione delle acque dolci terrestri, l'incidenza dei contaminanti inorganici sulle vie respiratorie, fino a raggiungere il

99% del credito nella categoria dell'uso delle risorse, minerali e metalli. Questo poichè una produzione secondaria evita l'impatto associato all'estrazione e alla lavorazione del metallo.

Mentre invece il vantaggio del recupero dell'alluminio è evidente oltre che nelle categorie come l'eutrofizzazione delle acque dolci e la riduzione dell'ozono, nel grafico riguardante le radiazioni ionizzanti, a causa dell'elevato consumo energetico richiesto nella produzione di alluminio di origine primaria.

Per quanto riguarda il silicio, notiamo che il maggior beneficio del suo recupero lo si evince per la categoria "uso del suolo" a causa dei processi di estrazione e trasformazione del suolo coinvolti nella produzione di silicio primario (Commissione Europea, 2013). Altri contributi rilevanti sono dati nelle categorie della scarsità d'acqua e del cambiamento climatico. Invece, il vantaggio del recupero del vetro lo si nota nelle categorie: ecotossicità in acqua dolce, eutrofizzazione marina e terrestre.

Per quanto concerne invece gli impatti di processo, questi sono maggiormente evidenti nelle categorie: riduzione dell'ozono, eutrofizzazione delle acque dolci e radiazioni ionizzanti. Per quanto riguarda la riduzione dello strato di ozono il maggior contributo è dato dal KOH usato per la lisciviazione, poichè esso rappresenta un co-prodotto della produzione del Cl gassoso. Un contributo significativo dell'idrossido è visibile anche nella categoria dell'eutrofizzazione a causa dell'elevata produzione di reflui durante la sua produzione. Nella categoria delle radiazioni ionizzanti, l'impatto risulta suddiviso tra smantellamento elettrico e produzione dell'idrossido. In entrambi casi il risultato è giustificato dal consumo e elettrico (valutato con un mix energetico europeo che include differenti fonti). La categoria delle radiazioni ionizzanti prende in considerazione, infatti, il rilascio

di radionuclidi emessi durante la produzione di energia nucleare, ma anche dall'estrazione di oli minerali e gas utilizzati sempre per produrre energia.
 Rif. (Frischknecht et al.).

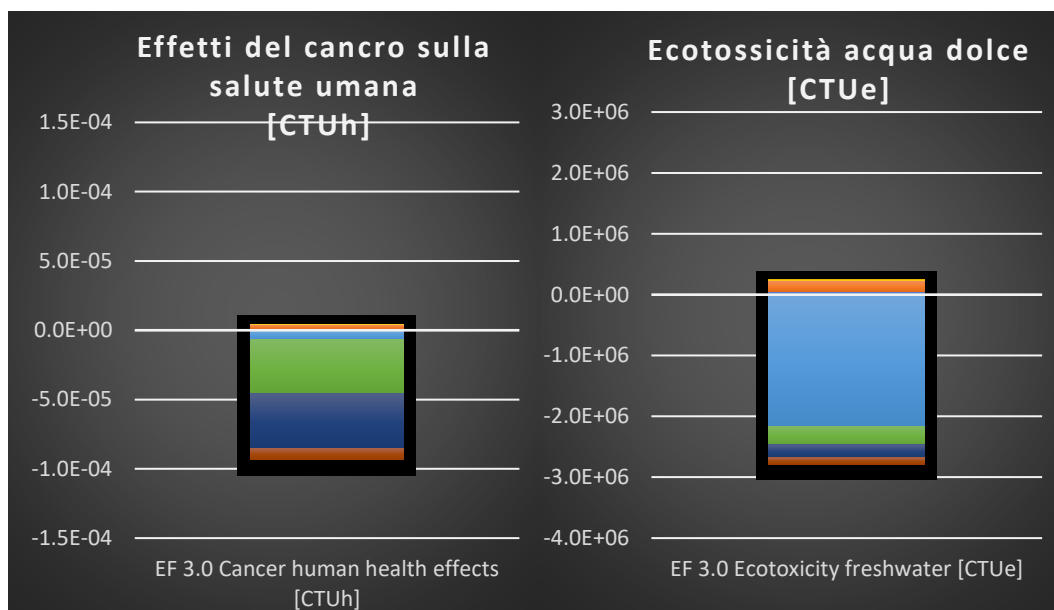
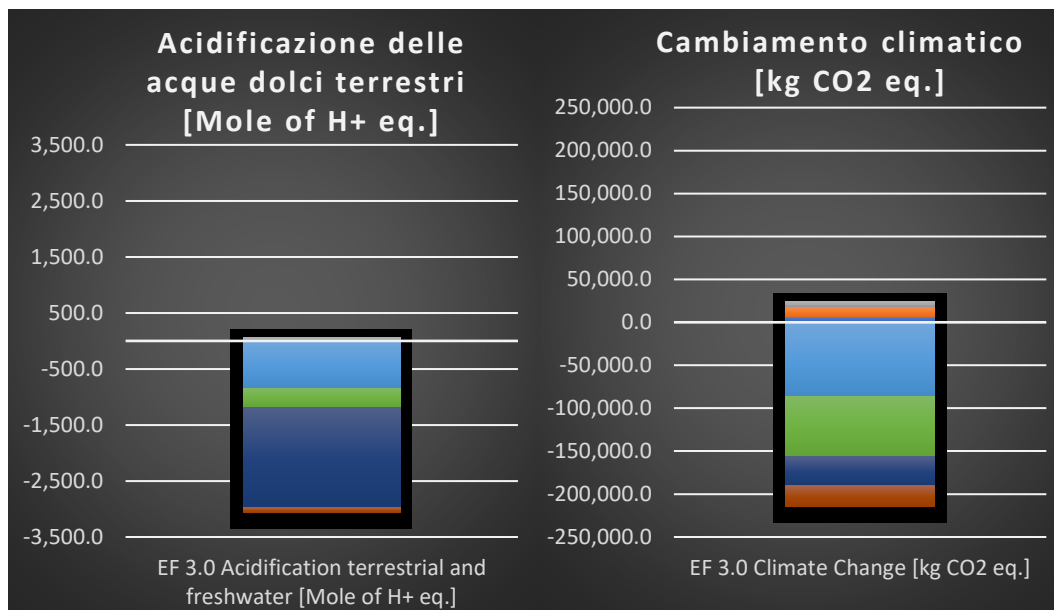


Fig.4.6 Risultati della fase di caratterizzazione dell'LCA (unità funzionale 100 tonnellate di pannelli fotovoltaici al silicio policristallino)...continua

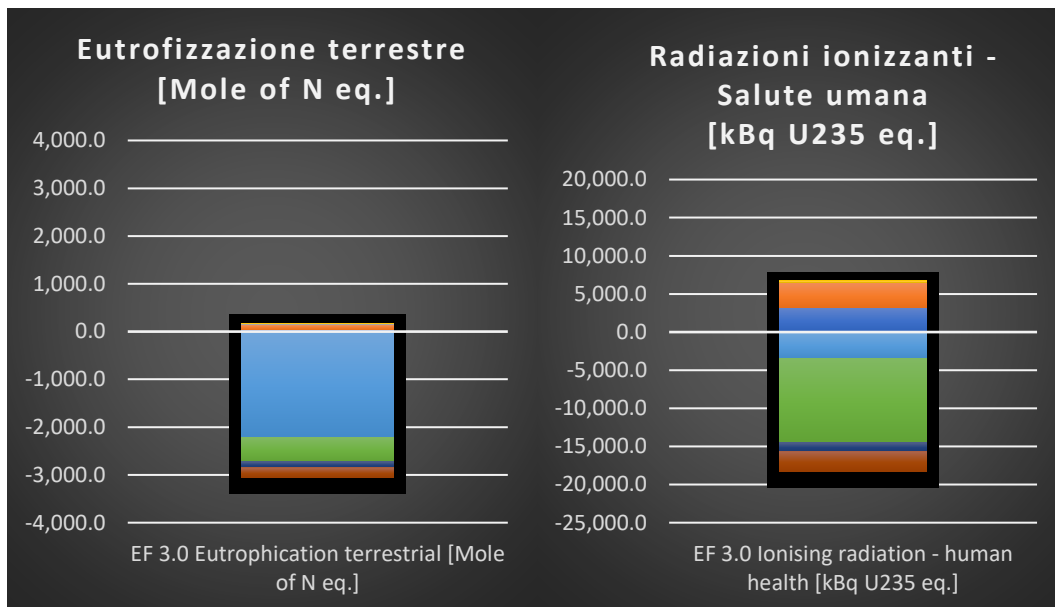
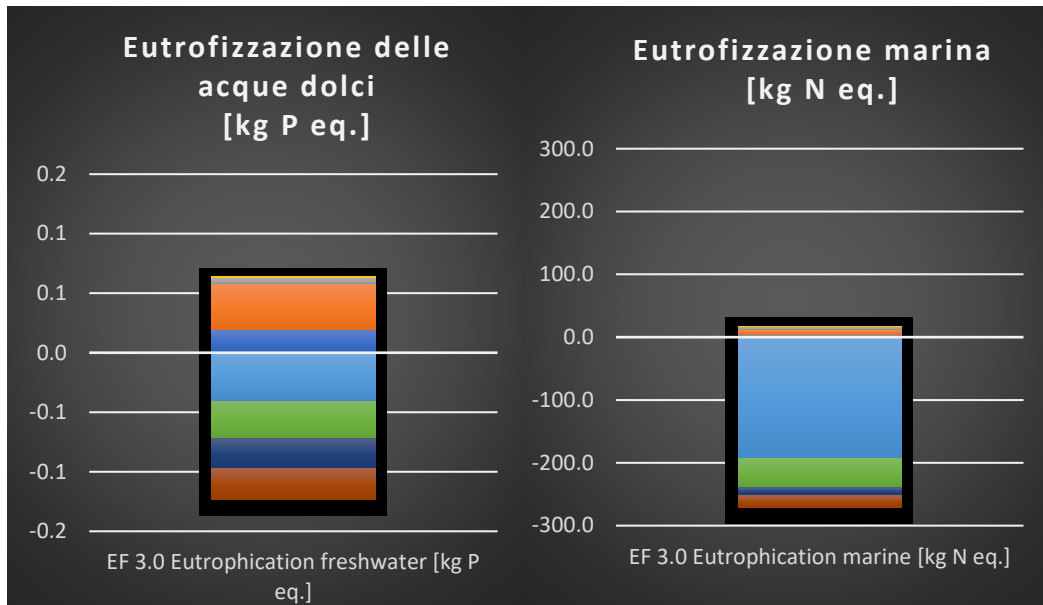


Fig.4.6 Risultati della fase di caratterizzazione dell’LCA (unità funzionale 100 tonnellate di pannelli fotovoltaici al silicio policristallino) ...continua

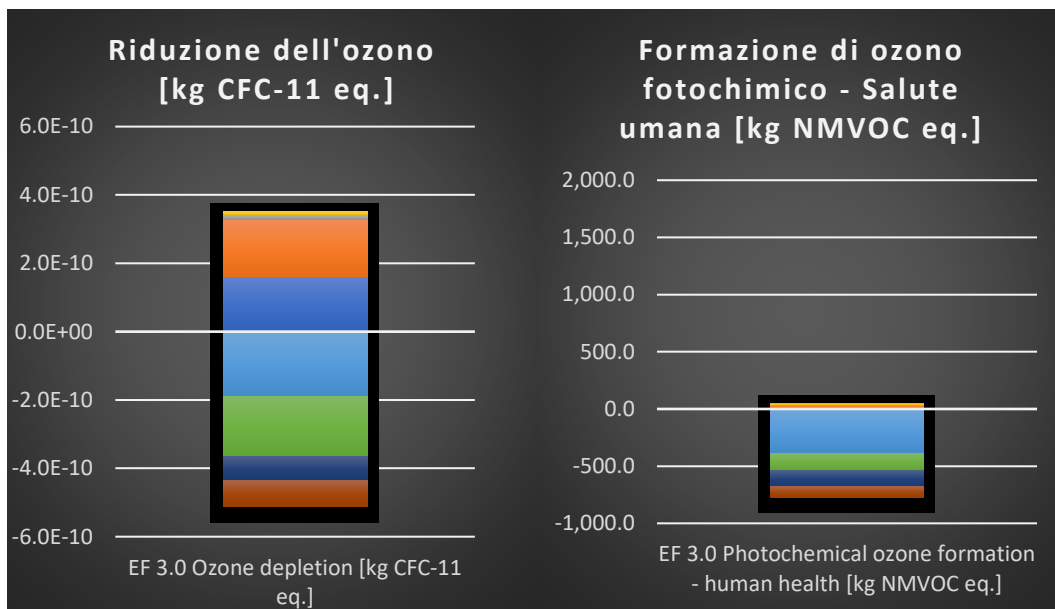
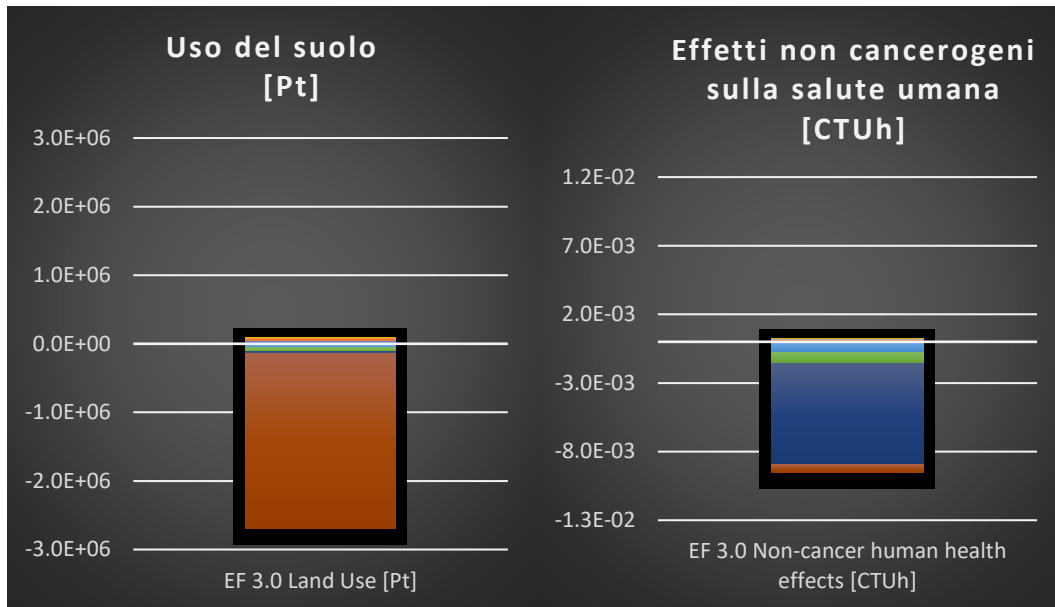


Fig.4.6 Risultati della fase di caratterizzazione dell'LCA (unità funzionale 100 tonnellate di pannelli fotovoltaici al silicio policristallino) ...continua

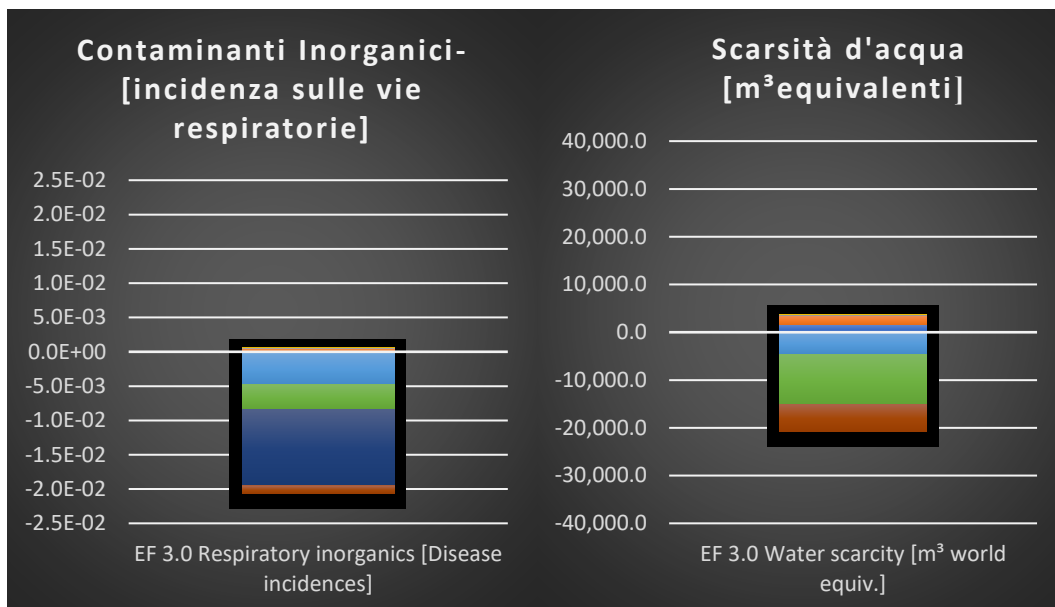
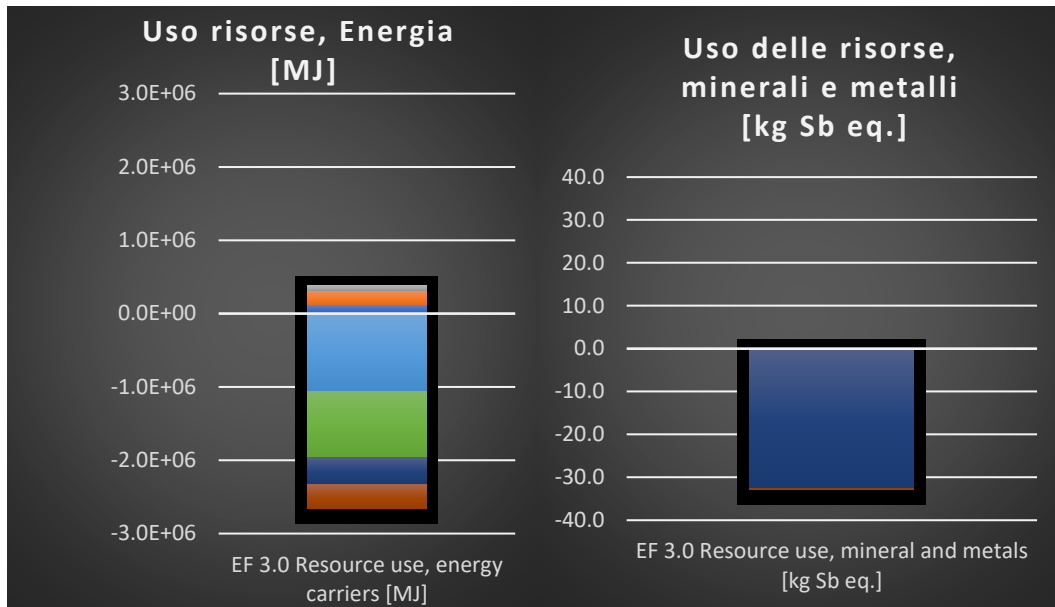


Fig.4.6 Risultati della fase di caratterizzazione dell'LCA (unità funzionale 100 tonnellate di pannelli fotovoltaici al silicio policristallino)

4.2.4 Normalizzazione e pesatura

Data la variabilità dei risultati nelle singole categorie, le fasi di normalizzazione e pesatura consentono di ottenere un risultato generale, comprensivo di tutti gli impatti e i crediti ambientali considerati nello studio.

In questa fase, si tiene conto di tutte le categorie di impatto, e si calcola un indicatore di prestazione ambientale totale relativo a ciascun processo; questo indicatore viene espresso come persone equivalenti, ovvero come il numero di persone-cittadini medi che generano quello stesso impatto in un anno.

Come mostrato in figura 4.7 è confermato il vantaggio del processo (-6100 p.e.), con maggiore contributo dell'argento grazie al suo recupero con una resa del 69%, seguito da vetro, alluminio e silicio, in maniera decrescente.

Per quanto riguarda l'impatto del processo, il grafico a torta (fig.4.8) dà informazioni rispetto ai contributi più rilevanti all'interno delle fasi principali del processo in particolare il KOH e lo smantellamento elettrico seguiti dall' HNO_3 e dai processi meccanici composti da 3 step: essiccazione, premacinazione e fresatura.

Si può notare come il KOH (50% dell'intero carico ambientale) e lo smantellamento elettrico (41% dell'intero carico ambientale) siano i contributi più impattanti. Mentre, l'energia delle due lisciviazioni non aumenti quasi per nulla l'impatto delle fasi di estrazione.

Anche il consumo energetico proveniente dai processi meccanici risulta essere non rilevante, contrariamente a quello associato al trattamento elettrico per il recupero dell'Argento.

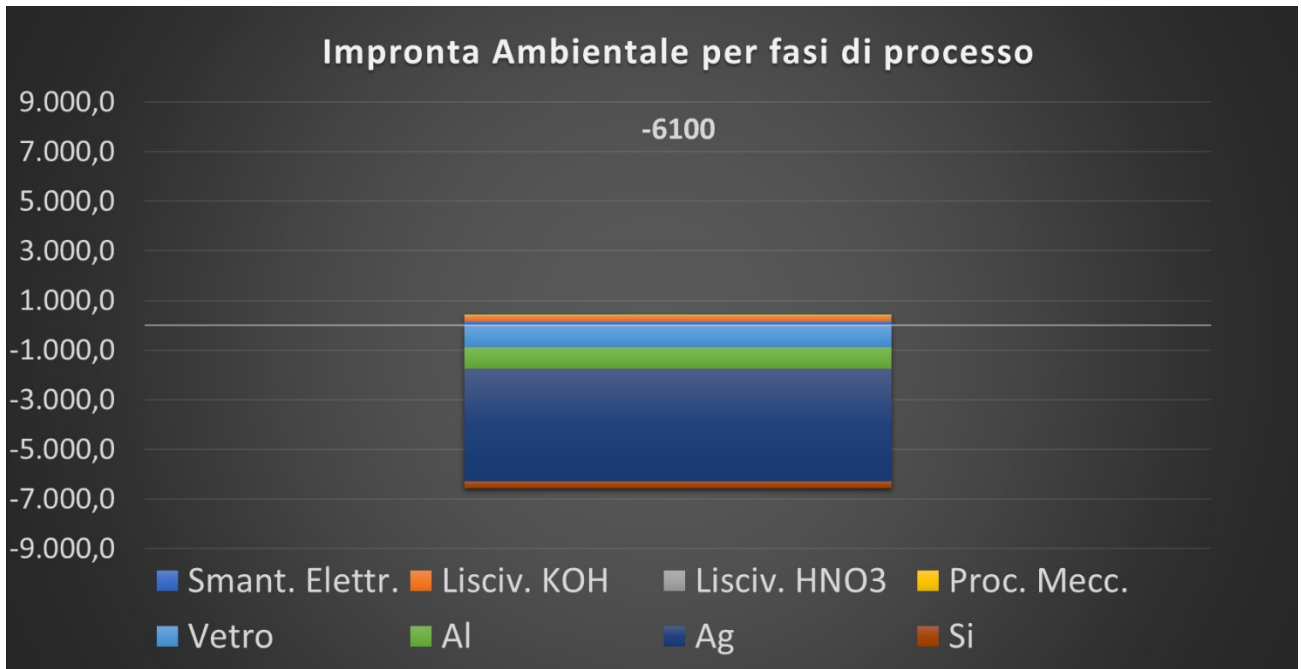


Fig.4.7 Quantificazione dell'impronta ambientale del processo dell'LCA (unità funzionale 100 tonnellate di pannelli fotovoltaici al silicio policristallino)

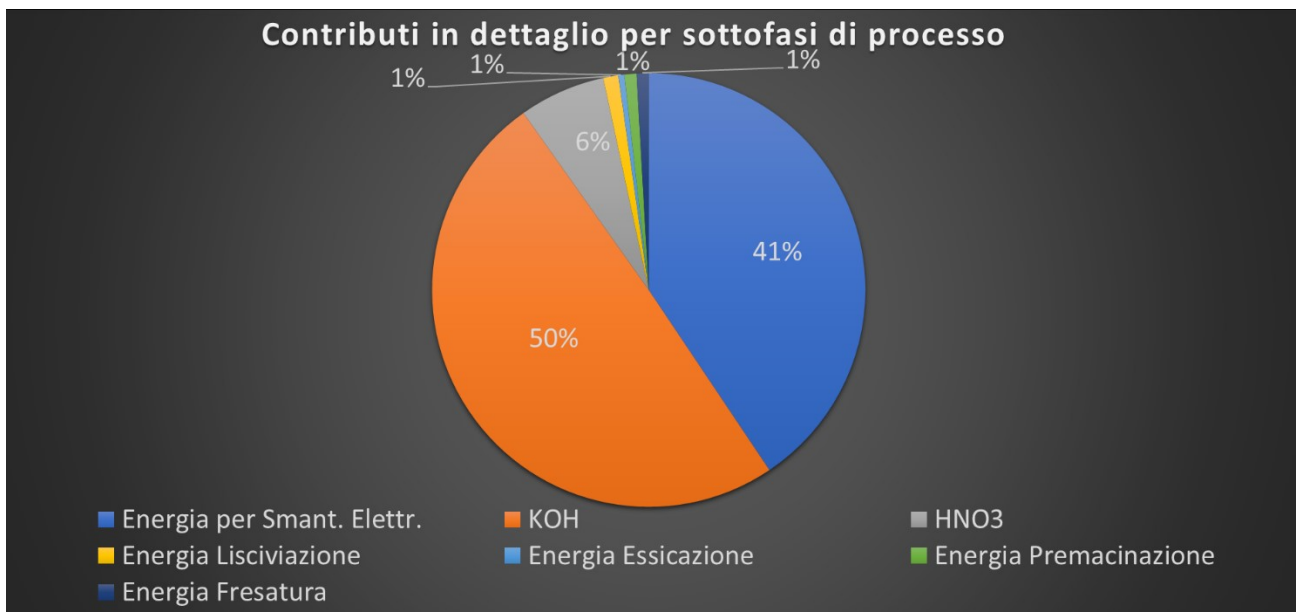


Fig.4.8 Quantificazione dell'impronta ambientale per sottofasi di processo (unità funzionale 100 tonnellate di pannelli fotovoltaici al silicio policristallino)

Per avere una stima del contributo delle diverse categorie di impatto è stato eseguito un ulteriore grafico (fig.4.9) dove si evince il grande guadagno nella categoria dell'uso delle risorse, dei minerali e dei metalli mentre la categoria più impattata è quella relativa alle radiazioni ionizzanti, comunque bilanciata dai crediti ambientali.

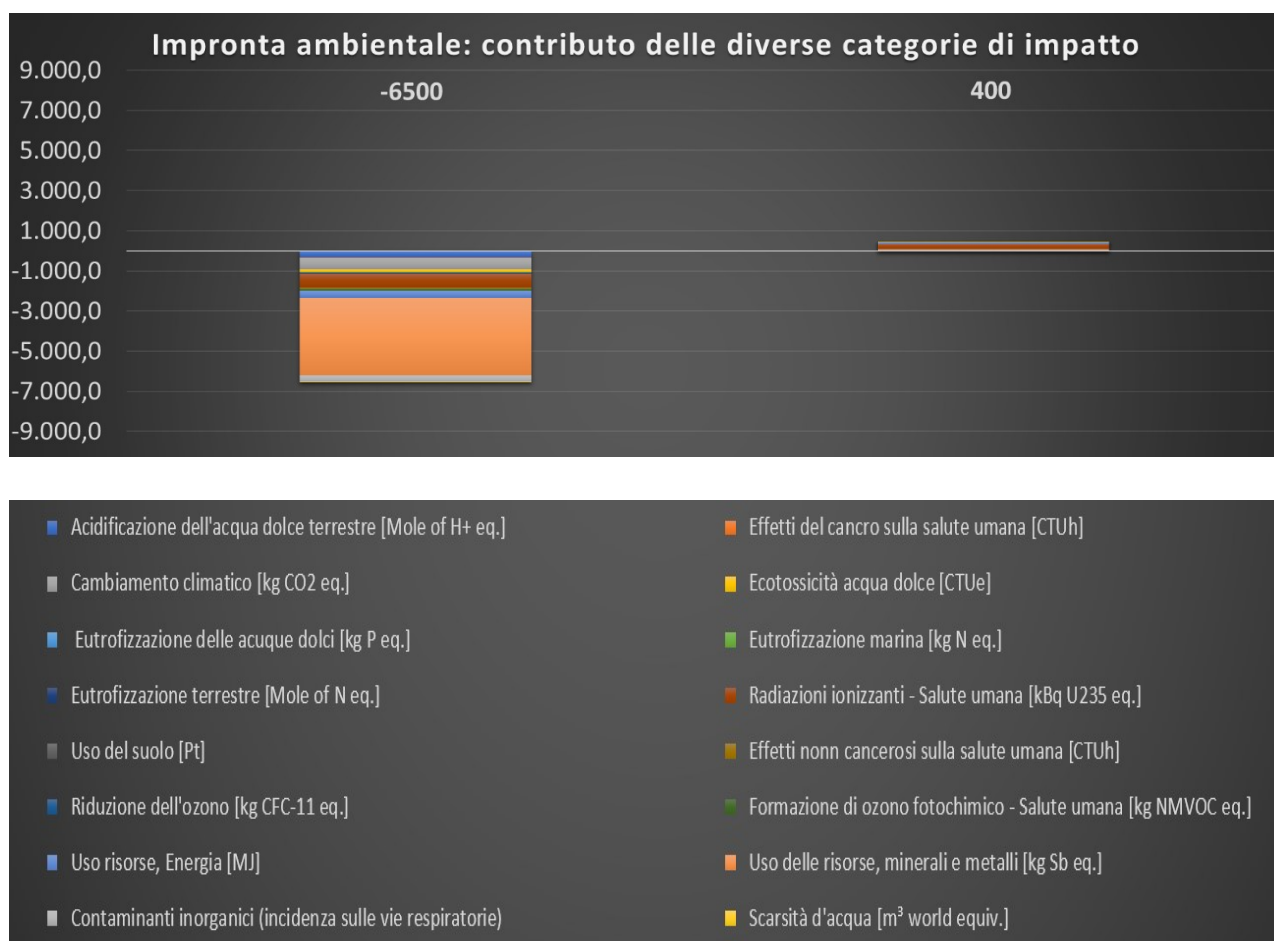


Fig.4.9 Contributo delle diverse categorie di impatto (unità funzionale 100 tonnellate di pannelli fotovoltaici al silicio policristallino)

L'ultima fase dell'analisi di sostenibilità ha confrontato 3 scenari di gestione dei pannelli fotovoltaici a fine vita: lo scenario oggetto dello studio appena descritto, il processo sviluppato nell'ambito del progetto Photolife e il conferimento in discarica come rifiuto non pericoloso.

Come si evince dalla figura 4.10, lo scenario peggiore è dato dalla discarica poiché non vi è alcun recupero ambientale, di contro per quanto riguarda gli altri due processi, entrambi risultano vantaggiosi.

Tale risultato è spiegato dal fatto che i crediti associati alle frazioni recuperate sono in grado di bilanciare gli impatti dei processi. Tuttavia, il caso studio, a fronte di un maggior impatto ambientale, risulta fino a 3 volte più vantaggioso del processo Photolife grazie all'aggiunta della valorizzazione dell'argento che non risulta presente in quest'ultimo.

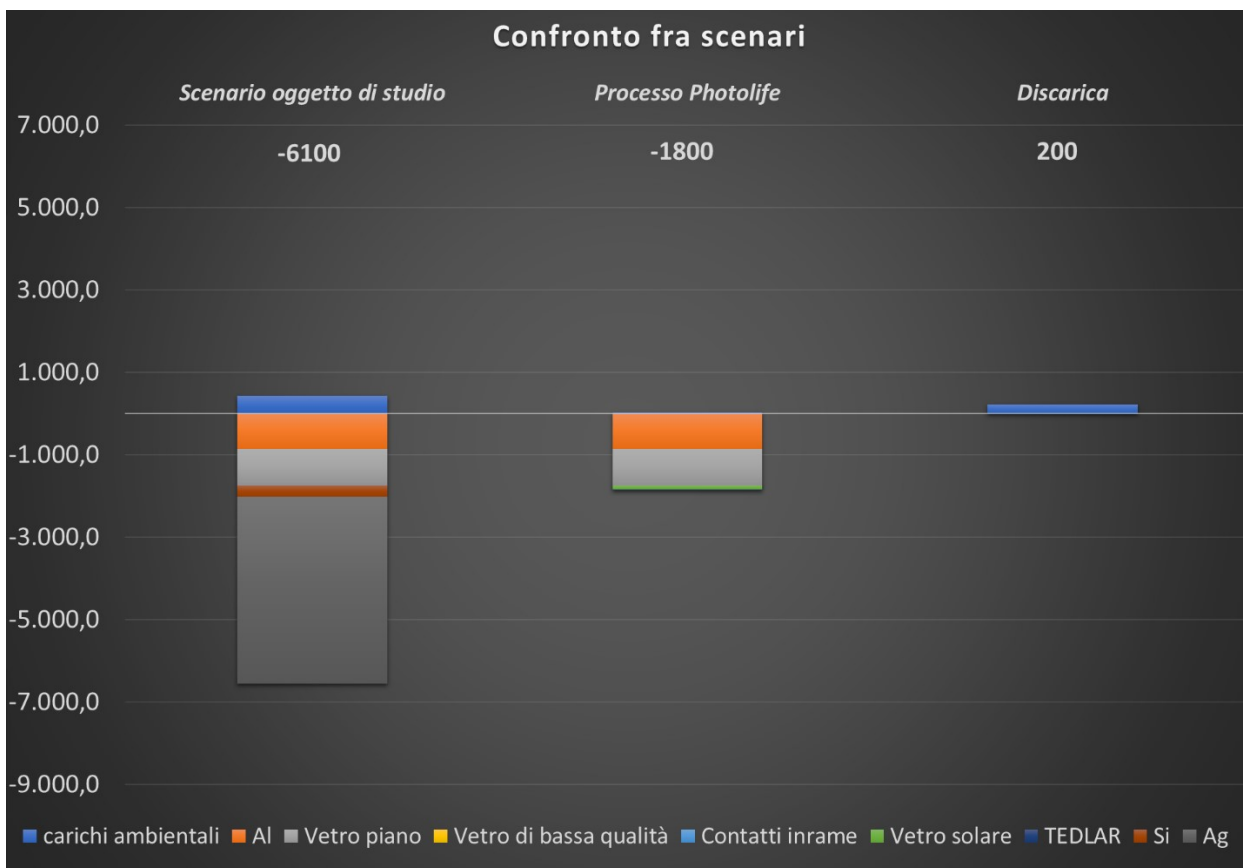


Fig.4.10 Confronto tra scenari (unità funzionale 100 tonnellate di pannelli fotovoltaici al silicio policristallino)

Conclusioni

Gli studi di previsione riguardo al riciclo, ed allo smaltimento futuro dei pannelli fotovoltaici evidenziano quanto sia importante in questo momento essere pronti con soluzioni sostenibili per il recupero di materie prime strategiche. Tali frazioni di valore, contenute all'interno dei singoli pannelli, non possono andare sprecate ma occorre trovare strategie per recuperarle e reimmetterle nei rispettivi cicli produttivi per impattare sempre meno l'ecosistema.

C'è un grande fermento scientifico per l'innovazione tecnologica in questo campo, come confermato dai numerosi studi scientifici sopracitati. Ciò dimostra quanto importante sia la ricerca di metodologie sempre più efficienti e sostenibili per la valorizzazione di pannelli fotovoltaici a fine vita, finalizzate al recupero di nuove risorse nell'ottica dell'economia circolare. Tra le varie proposte sono state identificate dalla letteratura scientifica nuove strade promettenti.

La valutazione della sostenibilità ambientale del presente studio ha evidenziato vantaggi rilevanti in termini di impronta ambientale rispetto allo smaltimento in discarica. Tra questi, lo smantellamento elettrico per il recupero dell'argento e il successivo trattamento dei wafer per il recupero del silicio nanodimensionato risulta essere molto incoraggiante per riuscire a soddisfare i requisiti di economia circolare e sostenibilità ambientale prefissati.

6. Bibliografia

- Amato A, Beolchini F. End-of-life CIGS photovoltaic panel: A source of secondary indium and gallium. *Prog Photovolt Res Appl.* 2019; 27:229–236. <https://doi.org/10.1002/pip.3082>;
- Ansanelli G., G. Fiorentino, M. Tammaro , A. Zucaro ENEA, *Applied Energy* 290 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116727>;
- Bogacka Magdalena, Martyna Potempa, Bartłomiej Milewicz , Dariusz Lewandowski, Krzysztof Piko , Katarzyna Klejnowska , Piotr Sobik, Edyta Misztal, *PV Waste Thermal Treatment According to the Circular Economy Concept*, *Sustainability* 2020, 12, 10562; doi:10.3390/su122410562;
- BOGUST PAMELA, YORK R. SMITH *Physical Separation and Beneficiation of End-of-Life Photovoltaic Panel Materials: Utilizing Temperature Swing and Particle Shape*, *JOM*, Vol. 72, No. 7, The Minerals, Metals & Materials Society, 2020, <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04197-2>;
- Carrabba P., Padovani L.M., *I PANNELLI FOTOVOLTAICI A FINE VITA Considerazioni sull’Impatto Ambientale e sulla Salute dei processi di smaltimento/riciclo/riuso* RT/2020/7/ENEA
- Chung Jaeshik, Bora Seo, Jooyoung Lee, Jae Young Kim, *Comparative analysis of I2-KI and HNO3 leaching in a life cycle perspective: Towards sustainable recycling of end-of-life c-Si PV panel*, *Journal of Hazardous Materials* 404 (2021) 123989, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123989>;
- De Oliveira Larisse Suzy Silva, Maria Tereza Weitzel Dias Carneiro Lima 2, Luciana Harue, Yamane and Renato Ribeiro Siman, *SILVER RECOVERY FROM END-OF-LIFE PHOTOVOLTAIC PANELS*, *Detritus / Volume 10 -*

Cisa Publisher. Open access article under CC BY-NC-ND license;

- Dos Santos Flavia Carla Martins Padoan, Pier Giorgio Schiavi, Gianmaria Belardi, Pietro Altimari, Antonio Rubino, and Francesca Pagnanelli, Material Flux through an Innovative Recycling Process Treating Different Types of End-of-Life Photovoltaic Panels: Demonstration at Pilot Scale, *Energies* 2021, 14, 5534 <https://doi.org/10.3390/en14175534>
- Eshraghi Nicolas, Loris Berardo, Audrey Schrijnemakers, Vincent Delaval, Mahdokht Shaibani, Mainak Majumder, Rudi Cloots, Bénédicte Vertruyen, Frédéric Boschini, and Abdelfattah Mahmoud 2020, Recovery of Nano-Structured Silicon from End-of-Life Photovoltaic Wafers with Value-Added Applications in Lithium-Ion Battery, *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2020, 8, 5868–5879 <https://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b07434>;
- Fan Yue et al., Study on Characteristics of Discharge Channels Induced by Pulsed Discharge in Water and Its Application in Solar Panel Recycling, 2020 Electrical Insulation Conference (EIC), Virtual Event;
- Frischknecht R. et al., “A. Braunschweig, P. Hofstetter e P. Suter, Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment” 2000
- Gazzetta Ufficiale dell’Unione Europea L124, 4 Maggio 2013
- Lim Soowon, Member, IEEE, Yuto Imaizumi, Kazuhiro Mochidzuki, Taketoshi Koita, Takao Namihira, Senior Member, IEEE, Chiharu Tokoro, Recovery of Silver From Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Cells by Wire Explosion *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, VOL. 49, NO. 9, SEPTEMBER 2021

- Singh Jasleen Kaur Daljit, Georgina Molinari, Jonathan Bui 1, Behdad Soltani, Gobinath Pillai Rajarathnam and Ali Abbas, 2021 Life Cycle Assessment of Disposed and Recycled End-of-Life Photovoltaic Panels in Australia, Sustainability 13, 11025. <https://doi.org/10.3390/su131911025>;
- Pagnanelli Francesca, Emanuela Moscardini, Pietro Altimaria, Flavia C.S.M. Padoan, Thomas Abo Atia, Francesca Beolchini , Alessia Amato, Luigi Toro, Solvent versus thermal treatment for glass recovery from end of life photovoltaic panels: Environmental and economic assessment, Journal of Environmental Management 248 (2019) <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109313>;
- Punathil Lineesh ,K. Mohanasundaram, K. S. Tamilselavan, Ravishankar Sathyamurthy ,and Ali J. Chamkha 5, Recovery of Pure Silicon and Other Materials from Disposed Solar Cells, 2021 Hindawi, International Journal of Photoenergy, Volume, Article ID 5530213, 4 pages <https://doi.org/10.1155/2021/5530213>;
- Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche RAEE Istruzioni operative per la gestione e lo smaltimento dei pannelli fotovoltaici incentivati, 2021 (ai sensi dell'art.40 del D.lgs. 49/2014 e dell'art.1 del D.lgs. 118/2020)
- Rubino A., Giuseppe Granata, Emanuela Moscardini, Ludovica Baldassari, Pietro Altimari, Luigi Toro, Francesca Pagnanelli, Development and Techno-Economic Analysis of an Advanced Recycling Process for Photovoltaic Panels, Enabling Polymer Separation and Recovery of Ag and Si, Energies 2020, 13, 6690; doi:10.3390/en13246690;
- Chiharu Tokoro, Soowon Lim, Yukihiro Sawamura, Masataka Kondo, Kazuhiro Mochidzuki, Taketoshi Koita, Takao Namihira, and Yasunori Kikuchi, Copper/Silver Recovery from Photovoltaic Panel Sheet by Electrical

Dismantling Method, Int. J. of Automation Technology Vol.14 No.6, 2020,
<https://doi.org/10.20965/ijat.2020.p0966>;

- Wang. Ruixue,ab Erxiao Song,ab Chenglong Zhang, ab Xuning Zhuang,ab En Ma,ab Jianfeng Bai,ab Wenyi Yuanab and Jingwei Wangab, Pyrolysis-based separation mechanism for waste crystalline silicon photovoltaic modules by a twostage heating treatment RSC Adv., 2019, 9, 18115;
- Xin Lu, Takahiro Miki, Osamu Takeda, Hongmin Zhu & Tetsuya Nagasaka (2019) Thermodynamic criteria of the end-of-life silicon wafers refining for closing the recycling loop of photovoltaic panels, Science and Technology of Advanced Materials, 20:1, 813-825, <https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1641429>.

Sitografia

- <https://risorse.sostenibilita.enea.it/research/activity/707>
- <https://www.enea.it/it/Stampa/news/energia-enea-e-enel-green-power-nel-progetto-ue-per-la-produzione-pannelli-fotovoltaici-da-riciclo>
- <https://www.gse.it/servizi-per-te/fotovoltaico/conto-energia/gestione-moduli>
- <https://fontidiennergiainnovabile.it/le-tecnologie-fotovoltaiche-convenzionali-avanzate/> (IRENA-Future of Solar PV 2019)
- <https://www.openinnovation.regione.lombardia.it/it/b/633/fotovoltaico-ecco-problemi-e-tecniche-per-recupero-e-riciclo-dei-modul>

7. Allegato

Assunzioni per l'analisi di sostenibilità ambientale

Dimensioni medie pannelli	Peso Standard in kg	Percentuali composizione del singolo pannello
Lunghezza: 170 cm	20	Vetro 76%
Larghezza: 100 cm		Polimeri (EVA, Tedlar) 10%
Profondità 4 cm		Alluminio 8%
		Silicio 5%
		Metalli Pesanti (Cu,Ag,Pb) 1%
		Argento 0,1%