

Tecnologie e processi di recupero del decommissioning fotovoltaico

In un contesto di sempre più crescente sviluppo del mercato fotovoltaico, è necessario porsi il problema del recupero e dello stoccaggio dei componenti degli impianti fotovoltaici. Il presente studio vuole analizzare le tecnologie e i processi di riciclo dei pannelli fotovoltaici a seconda della tipologia di pannello dalla produzione del pannello all'installazione e alle diverse tipologie di decommissioning.

TECHNOLOGIES AND PROCESS FOR PHOTOVOLTAIC DECOMMISSIONING

In a context of ever-increasing development of the PV market, it is necessary to consider the problem of the recovery and storage of components of photovoltaic systems. The present study aims to analyze the technologies and processes for the recycling of photovoltaic panels depending on the type of panel by the panel production installation and the different types of decommissioning.

INTRODUZIONE

Il mercato fotovoltaico sta vivendo un rapido e sempre crescente sviluppo. Se si considera che la vita media di un impianto fotovoltaico è di circa 20 - 25 anni, all'interno delle diverse aziende produttrici di moduli fotovoltaici, sta acquisendo una sempre maggiore consistenza il problema del recupero e dello stoccaggio dei componenti degli impianti fotovoltaici. In questo contesto, il presente lavoro vuole dimostrare come il riciclo dei moduli fotovoltaici non sia solamente tecnicamente ed economicamente fattibile, ma una volta implementato porterà a una diminuzione significativa dell'impatto ambientale degli impianti PV. Già oggi, l'attuale tipologia di moduli fotovoltaici mostra una significativa riduzione d'impiego di silicio per kWp di pannello prodotto, dovuta principalmente a un aumento delle celle e del modulo di efficienza, e ad un'ottimizzazione dei fotogrammi e delle cassette di giunzione.

Uno dei passi fondamentali verso un uso sostenibile dell'energia e dei materiali è il riciclaggio. Diversi studi dei processi industriali hanno dimostrato che il riciclaggio di moduli fotovoltaici non è soltanto tecnicamente ed economicamente fattibile, ma potrebbe diminuire significativamente l'impatto ambientale ed ecologico.

Nell'ambito dei processi di mercato, se ne registrano due che sono gestiti su vasta scala: il processo di trattamento di Deutsche Solar, che viene utilizzato principalmente per i moduli di silicio cristallino, e il processo di trattamento di First Solar, che viene utilizzato per i moduli tipo CdTe. Processi per le altre tecnologie sono in fase di sviluppo. In aggiunta al vetro, i processi sono tecnicamente in grado di estrarre anche silicio e CdTe come frazioni separate, avviandole su altri percorsi di riciclaggio. Entrambi i processi sono quindi in grado di fornire elevate frazioni di riciclaggio.

COMPOSIZIONE DEI PANNELLI

Si può affermare che dal 2004 a oggi, la composizione dei moduli fotovoltaici non è molto cambiata. In generale, vista la forte espansione del mercato PV e la contrazione dei prezzi, si è notata una tendenza, da parte delle società produttrici di pannelli PV, a prediligere soluzioni tecnologiche che da un lato portino a un incremento dell'efficienza di conversione del pannello e dall'altro a minimizzare l'uso di materie prime per la produzione dello stesso.

Allo stato attuale, le tecnologie di produzione delle celle fotovoltaiche si dividono sostanzialmente in:

- moduli
 - silicio Monocristallino c-Si;
 - silicio Policristallino mc-Si.
- film sottile
 - diseleniuro di indio rame gallio (CIGS);
 - silicio Amorfo a-Si;
 - telluro di Cadmio (CdTe).

Di seguito analizziamo i diversi materiali e componenti per ciascuna tipologia di pannello.

CSI

Nell'ambito dei moduli in silicio cristallino (CSI), le componenti principali sono il pannello laminato, che consiste in uno strato di vetro solare di spessore di 3 - 4 mm, EVA e un supporto di film, che consiste principalmente in un foglio di PET, rivestito di PVF su entrambi i lati. I moduli sono dotati di un telaio in alluminio che garantisce uno sviluppo sul piano.

Nella Figura 1 si riporta la composizione di tre tipologie di moduli CSI, legate a tre case di produzione diversa, che volutamente sono state mantenute anonime.

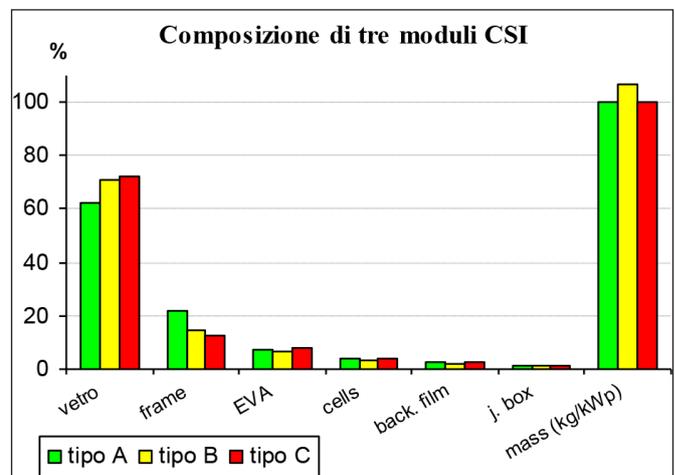


FIGURA 1 - Composizione di due moduli CSI

Si può osservare che:

- la massa intesa come rapporto tra peso e la potenza (kg/kWp) varia dal 99% al 107%.
- il vetro, con uno spessore che varia dai 3 ai 4 mm, è presente con una percentuale tra il 60% e il 75%;
- le celle variano in composizione dal 3,9% al 4,2%;
- le scatole di giunzione occupano una percentuale intorno al 1,1%;
- l'EVA varia dal 6,7% al 8%.

CIGS

I moduli di tipo CIGS con telaio in alluminio presentano le seguenti caratteristiche:

- i frammenti di vetro e alluminio combinati compongono il 93% del modulo;
- l'incapsulamento (EVA) rappresenta il 3%;
- il cavo e la scatola di giunzione rappresentano il 2%;
- i componenti restanti costituiti dal 2%.

Analizzando la massa presente sulla superficie (kg/m²), si evidenzia che il vetro e l'alluminio occupano rispettivamente 7,5 kg/m² e 2,3 kg/m².

Nella Figura 2 si riporta il peso dei rimanenti diversi componenti, in due modelli di moduli di tipo CIGS di due diversi produttori.

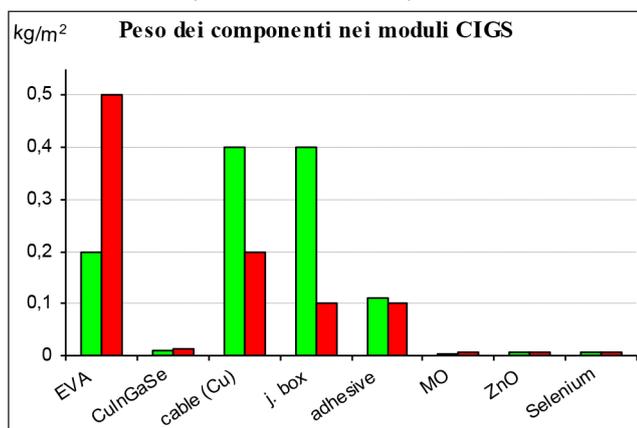


FIGURA 2 - Peso delle composizione di due moduli CIGS

Osserviamo che:

- l'EVA varia da 0,5 a 0,2 kg/m², comportando una variazione del 60%;
- il Cu ha una variazione del 50%, passando da 0,4 a 0,2 kg/m²;
- il materiale di giunzione varia da 0,4 a 0,1 kg/m²;
- il CuInGaSe occupa un peso variabile tra i 0,01 e 0,012 kg/m²;
- lo ZnO ha un peso compreso tra 0,006 e 0,007 kg/m²;
- il Selenio è presente con 0,005 o 0,006 kg/m².

a-Si

La tecnologia costruttiva descritta per i moduli CIS si applica a quelli tipo a-Si (silicio amorfo) nel caso in cui questi ultimi sono racchiusi da vetro. Nel caso di alcuni prodotti, come ad esempio quelli della Free Energy Europe, il poliuretano è usato al posto dell'alluminio con una percentuale del 12% sul peso. Il vetro di protezione costituisce l'87%, tutti gli altri materiali, insieme, rappresentano meno dell'1%. Altri produttori di moduli a-Si utilizzano spesso polimero composto da lamine invece del vetro finalizzato all'incapsulamento. Di conseguenza, il peso totale dei moduli è ridotto. Nella Figura 3 si riporta il peso delle diverse componenti del modulo di tipo a-Si rispetto al modulo (g) e alla superficie (g/m²). Si sottolinea che

il boro e il fosforo hanno un peso per modulo pari rispettivamente a 1,18 10⁻⁵ g/m² e 1,21 10⁻⁷ g/m².

Osserviamo che:

- il vetro ha un peso rispetto alla superficie di 13 g/m²;
- l'Al ha invece un peso pari a 1,8 g/m²;
- il Si 1 g/m².

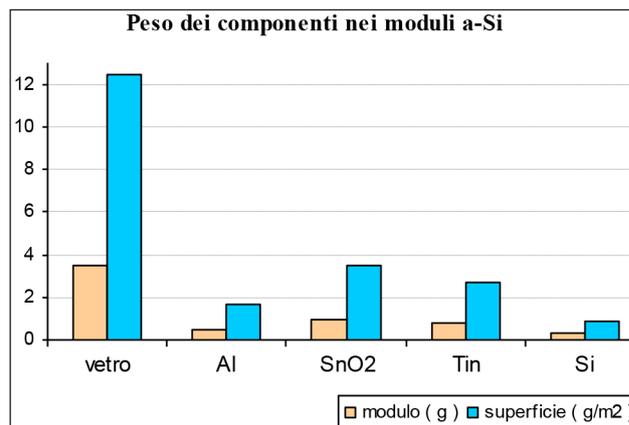


FIGURA 3 - Peso della composizione nei moduli a-Si rispetto al modulo ed alla superficie

CdTe

Nella Figura 4 si riporta la composizione tipo dei moduli tipo CdTe rispetto alla superficie. I dati per le periferiche (cavi, cornici, ecc) sono stati ripresi dalla tecnologia CSI. Per quanto riguarda il materiale di incapsulamento, i produttori sono in grado di utilizzare la stessa gamma di laminati che viene applicata nel settore dei moduli di silicio cristallino: fluoropolimeri quali ETFE, PVF, PVDF, PET, EVA e in alcuni casi foglio di alluminio.

Osserviamo che il vetro nella componente del substrato e della parte frontale ha un peso pari a 7,5 kg/m², mentre l'EVA ha un peso di circa 0,5 kg/m².

Peso dei componenti nei moduli CdTe

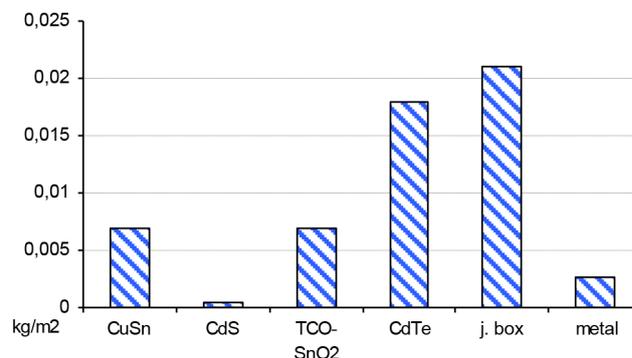


FIGURA 3 - Peso della composizione nei moduli CdTe rispetto alla superficie

Osserviamo che:

- il CdTe ha un peso rispetto alla superficie di 0,017 kg/m²;
- il CuSn ha un peso pari a circa 0,007 kg/m²;
- il TCO-SnO₂ ha un peso pari a circa 0,007 kg/m²;
- il junction box ha un peso di circa 0,021 kg/m².

TECNICHE DI RICICLO

Considerato lo sviluppo del mercato fotovoltaico, non si può ipotizzare un'uniforme ipotesi di riciclo del modulo. Quest'ultima deve considerare l'elevata quantità di rifiuti da trattare, i motivi economici, l'impatto sulla sicurezza, i cicli di produzione e soprattutto l'utile di investimento. Pertanto, i processi tecnici devono soddisfare i seguenti requisiti:

- flessibilità dei processi per raggiungere un sufficiente throughput;
- implementazione della tecnologia di riciclaggio, in combinazione con le fasi di efficacia e di basso costo;
- adempimento delle percentuali di riciclaggio e degli obiettivi di costo;
- basso impatto ambientale causato dai processi di trattamento e riciclaggio (emissioni, rifiuti secondari);
- scalabilità e decentralizzazione a lungo termine.

Nella Tabella 1 sono contenute le operazioni base nel trattamento e riciclaggio dei moduli fotovoltaici. Risulta evidente che una tecnologia di riciclaggio deve interfacciarsi con le caratteristiche di una vasta gamma di rifiuti.

Physical/mechanical	Crushing Attrition Density separation Flotation Adsorption Radiation Metal separator other
Chemical	Acid/base treatment Solvent treatment other
Thermal	Incineration Pyrolysis Melting, slagging other
Biological	-
Radiation	-
Disposal	Recycling into the same product Recycling into another product Recovery of energy from the thermal treatment of organic layers Utilization of the volume of mineral fractions (e.g. concrete aggregates, road construction) Landfill cover other

TABELLA 1 - Operazioni base nel trattamento e riciclaggio dei moduli PV

I primi studi sul riciclaggio sono nati a partire dal 1980 sulla base delle seguenti considerazioni:

- esperienze dei vari produttori mondiali;
- mercato fotovoltaico;
- sensibilità dei clienti sull'aspetto ambientale;
- possibili effetti della tecnologia fotovoltaica sull'ambiente;
- potenzialità delle prime fasi di sviluppo delle tecnologie di trattamento dei rifiuti.

A livello internazionale, la ricerca sul riciclaggio è cominciata agli inizi degli anni novanta attraverso aziende come l'AEG e proseguita con la Pilkington Solar International GmbH, la BP Solar, la Siemens Solar, la Soltech, la Solar Cells Inc. e con istituti come l'AIST, coinvolgendo nazioni come il Giappone e gli Stati Uniti d'America. Il ricorso al riciclaggio è cresciuto proporzionalmente all'aumentare dei rifiuti. Nei primi tempi l'attività principale si è incentrata sull'integrazione dei moduli. Nel frattempo i produttori hanno iniziato a sperimentare i cicli orientati al riciclaggio. Per il prossimo futuro, tuttavia, il processo produttivo non sarà ancora redditizio in quanto la mole dei rifiuti trattata non sarà tale da far lavorare gli impianti di riciclaggio a pieno regime. Nella tabella 2 sono descritte le principali

attività di riciclaggio impiegate dalle principali produttrici di pannelli.

Operator	Procedure	Size/Stage of Development	PV Technology
Deutsche Solar AG	Thermal separation, chemical processing	Pilot production, ecological consideration	Crystalline, thin film in laboratory
First Solar (Solar Cells Inc.), BNL	Thermal decomposition in Inert gas	Laboratory	Crystalline
Isotofon	Cell recycling Swelling Shredding Repairable module	Laboratory	Crystalline
AIST, Sharp, Asahi	Water recycling with mineral acids Solvent swelling (Cellsepa-Process) Repairable module	Laboratory	Crystalline
Photovoltch	Repairable module	Laboratory	Crystalline
BP Solar, Soltech, Seghers	Water recycling with mineral acids Water recycling in fluidized bed	Laboratory/Technical college	Crystalline
Pilkington Solar International	Thermal separation	Laboratory/Technical college	Crystalline
Siemens Solar, Shell Solar, Showa Shell	Ferrosilicon production High pressure water jet	Laboratory	Crystalline, thin film
Other	Module shredder, Mechanical separation Acid treatment Smelter, MWI Concrete aggregates, road construction	Laboratory	Crystalline, thin film
Disposer	Removal of frames and cable, disposal, incineration	Production	all

TABELLA 2 - Attività di riciclaggio maggiormente conosciute

PROCESSI

La First Solar ha sviluppato un processo per moduli cristallini che interessa celle con una base di EVA e tedlar inizialmente scaldate lentamente e a cui viene rimosso manualmente il sostegno del film. Successivamente l'EVA è pirolizzata in atmosfera di gas inerte a circa 500 °C. I costi di questa tecnologia sono di \$ 0.13/Wp, rispetto a \$ 1,5/Wp necessari per una nuova cella. Tale tecnologia non può essere realizzata in Germania a causa del fatto che le licenze per gli impianti pirolizzati richiedono requisiti molto rigorosi. Il processo non è in uso attualmente.

Un secondo processo è quello sviluppato dalla Pilkington Solar International GmbH è il risultato di un progetto di ricerca in Germania. L'obiettivo iniziale era quello di integrare il modulo riciclato in processi di riciclaggio esistenti. Sin dagli anni Novanta è stata studiata la separazione meccanica per il vetro stratificato. Dalle recenti prove effettuate presso il centro FH Amberg è emerso che non vi è una sufficiente purezza delle varie frazioni di materiale. Inoltre, non era stato possibile separare in modo sufficiente vetro silicio e materie plastiche. Ciò significa che la parte principale della frazione non può essere utilizzata al meglio. Questo è stato il primo processo che ha portato al successo nel recupero delle celle solari composte da moduli da incenerimento a bassa temperatura.

Un terzo processo è stato sviluppato dalla Soltech/Seghers e rientrato nell'ambito di un progetto comunitario. La procedura sembra essere tecnicamente semplice e presenta un costo contenuto (\$ 0.22/strato). Come per il metodo sviluppato dalla First Solar, si è ottenuto un rendimento fino all'80%, impiegando azoto come gas inerte. Questa metodologia, inoltre, consente di avere uno spessore maggiore a causa dell'elevato utilizzo di ossigeno. La metodologia soddisfa i requisiti in materia di separazione della polvere e contribuisce in misura significativa ai costi. La procedura non viene utilizzata.

Negli Stati Uniti sono stati condotti studi in merito alle diverse tecniche di riciclaggio per i diversi tipi di modulo. In particolare sono stati studiati i moduli come aggregati per fusione metallurgica con separazione con getto d'acqua. Mediante questo processo si interviene sui costi di trasporto dei

moduli e lo smaltimento degli stessi. Attualmente i costi di trasporto negli Stati Uniti sono tra \$ 0,04 e 0,12/Wp; lo smaltimento ha costi tra \$ 0,01 e 0,35/Wp.

In occasione della Conferenza di Amsterdam sul fotovoltaico, BP Solar ha presentato un processo di decomposizione EVA utilizzando minerale acido, offrendo come risultato la possibilità di recuperare gli strati intatti. Il processo, tuttavia, non funziona con tutti i materiali ed è adatto solo per ben definiti requisiti di base.

Il processo CELLSEPA® consiste nel gonfiare strati di vetro EVA e nel separare lamine di EVA con limonene, ottenuto da agrumi. Questo processo, tuttavia, non è adatto per il recupero di celle intere e richiede un lungo periodo di swap-out per rompere le celle da gonfiare.

Processo di Riciclo Deutsche Solar AG

Il processo di trattamento e riciclaggio ideato dalla Deutsche Solar AG consiste nella separazione dei componenti del modulo mediante due fasi:

1. rimozione dei componenti di plastica del modulo mediante trattamento termico;
2. recupero dei wafer di silicio, eliminando la cella solare attraverso processi meccanici.

Questo processo ha raccolto e riciclato più MWp di moduli e celle solari dei vari produttori. Le fasi principali del processo sono riportate in Figura 5.

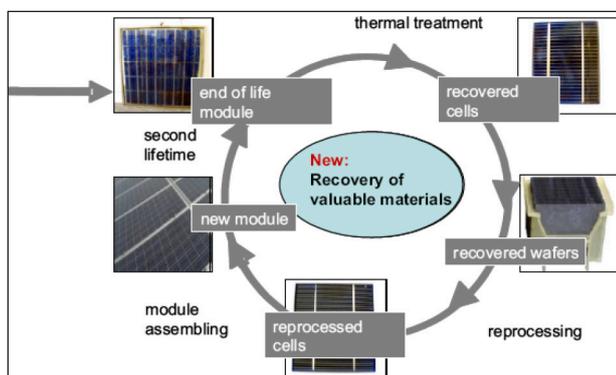


FIGURA 5 - Fasi principali del processo di riciclaggio della Deutsche Solar AG

Una caratteristica di questa procedura consiste nella possibilità di recuperare wafer dai moduli. Dal 2006 ad oggi moltissimo materiale è stato recuperato con successo. Attualmente non sono ancora disponibili i valori dei tassi di riciclaggio in funzione delle categorie dei moduli e i dati inerenti il montaggio degli stessi. Il tasso medio di riciclo è attualmente circa l'80% senza prendere in considerazione il trattamento termico dei componenti di plastica. Si descrivono le diverse fasi del processo.

Dopo l'iniziale recupero, i moduli vengono messi in un impianto di incenerimento, dove i componenti di plastica vengono bruciati in un complesso processo in cui i semiconduttori sono protetti alla temperatura di 600 °C. I restanti materiali come le celle solari, il vetro e i metalli sono separati manualmente. Il vetro e i metalli (alluminio, acciaio, rame, ecc) sono inseriti in processi di riciclaggio e le celle solari sono inserite nel nuovo wafer. Se la metodologia è correttamente applicata, il vetro può essere recuperato completamente intatto.

Le celle solari ottenute vengono pulite attraverso un processo chimico al fine di ottenere un nuovo wafer di silicio. Queste ultime soddisfano tutte le esigenze di qualità e possono essere rielaborate come celle e moduli solari.

I requisiti in materia di processo di riciclaggio sono dominati da considerazioni tecniche, economiche e di sicurezza. Un valore aggiunto da considerare consiste nella coerenza con le specifiche del cliente. Quest'ultimo può essere ottenuto a basso costo, intervenendo sul processo di incisione del wafer e realizzando un unico processo scalabile che si articola nelle seguenti fasi:

- rimozione metallizzazione;
- rimozione strato AR;
- rimozione isotopica strati n, p e drogaggio;
- finitura superficiale;
- risciacquo;
- essiccazione.

L'incisione sullo strato avviene attraverso una traccia ombra che successivamente viene rimossa. Si dimostra che i wafer nuovi e riciclati hanno le stesse caratteristiche elettriche. Si avrà un costo di realizzazione del pannello riciclato inferiore a quello previsto per uno nuovo, a parte il caso in cui vi siano dei danni causati dalla lavorazione.

Sulla base dei riscontri avuti dai produttori di celle solari, i diversi processi di incisione sono stati impiegati in modo da essere rimossi solo gli strati superficiali in un modo altamente selettivo. Considerato che il materiale riciclato viene restituito al produttore originale, potrebbero esserci dei vantaggi qualora venissero rispettate alcune delle seguenti condizioni:

- conservando quasi tutto il loro livello di spessore, vi sono meno rotture;
- i test sono rispettati, soprattutto nel caso in cui vengono impiegati gli iso-acidi;
- lo spessore del wafer corrisponde a quello di uno nuovo dopo incisione;
- il wafer si trova nella posizione corretta durante il processo;
- un nuovo adeguamento della linea di processo non è necessario.

A causa dell'impiego dell'acido possono verificarsi danni alla superficie delle fette, in particolare in prossimità degli attacchi. Tale danno è generalmente rimosso durante il processo di riciclo delle celle solari.

Progetto SENSE

Il progetto comunitario SENSE ha sviluppato un approccio per il riciclaggio dei moduli a film sottile, come indicato nella Figura 6. Il processo, che è stato sviluppato per moduli CIS, si compone delle seguenti fasi.

Innanzitutto si attivano processi di separazione del vetro e dei diversi strati: separazione con getto d'acqua, trattamento termico, frantumazione, fresatura e vagliatura. In primo luogo, il materiale solido è stato trattato in ambiente acido (H_2SO_4 e H_2O_2). In una seconda fase di estrazione (stripping), l'indio è trasferito a una soluzione acquosa acida, da cui sono stati precipitati chimicamente e filtrati. Il selenio può anche essere estratto da una soluzione di precipitazioni elementari. L'ultima estrazione e la pulizia delle preziose sostanze di indio e gallio possono essere effettuate in un impianto specializzato utilizzando metodi specifici come, ad esempio, l'elettrolisi. I processi meccanici non realizzano una completa separazione degli strati di vetro. Il getto d'acqua è troppo costoso e non adatto per grandi moduli; fresatura e schiacciamento causano in modo inopportuno molte parti di frazione fine. Una completa separazione dei moduli di vetro è stata raggiunta tra i 450 ed i 500 °C. Le emissioni di gas sono risultate nella norma. Dalle prove condotte su 1 kg di moduli fotovoltaici con tecnologia CIS riciclati è stato possibile recuperare:

- 435 g di selenio rosso;
- 178 g di idrossido di indio;
- 69 g di idrossido di gallio.

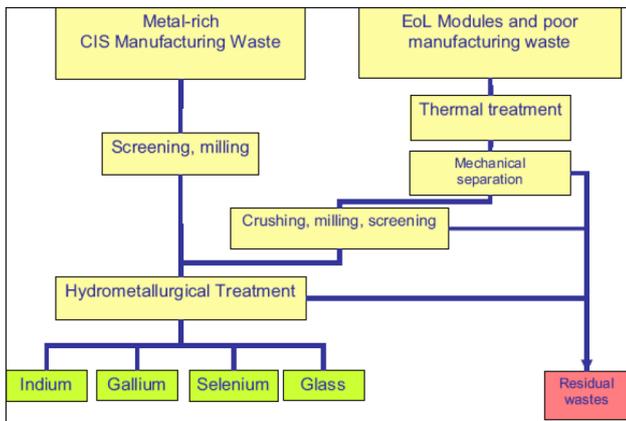


FIGURA 6 - Fasi del processo di riciclaggio del progetto SENSE

Processo di riciclaggio modulo CdTe - First Solar

Un metodo per il riciclaggio dei moduli tipo CdTe a film sottile è quello della First Solar, sviluppato dalla fine degli anni novanta negli Stati Uniti. Il processo è stato recentemente ridimensionato alla piena produzione negli Stati Uniti (capacità di 10 t/giorno) ed è stato replicato a Francoforte / Oder. Le dimensioni dei moduli sono ridotti in un processo costituito da due fasi. Nella prima si attua una frantumazione per rompere i moduli in grandi pezzi per agevolarne il trasporto. Nella seconda fase il vetro è ulteriormente frantumato da un mulino. Lo scopo è rompere il legame di laminazione, in genere inferiore a 5 mm. Si utilizza un sistema di aspirazione per eliminare tutte le parti del secco durante il processo di riciclaggio che utilizza un sistema di filtraggio in due fasi.

Si realizza un film di semiconduttori che viene depositato su un tamburo per un periodo di 4 - 6 ore. Una piccola quantità di acido solforico e perossido di idrogeno è aggiunta al vetro schiacciato per ottenere un ottimale rapporto solido-liquido. Il tamburo è costruito in acciaio inossidabile per protezione contro le aggressioni chimiche. Al completamento del ciclo di lavorazione, la rotazione del tamburo, è invertita per svuotarne il contenuto. Il contenuto del tamburo viene spostato in un classificatore dove il vetro è separato dai liquidi. Una vite di rotazione veicola il vetro su un piano inclinato, lasciando alle spalle i liquidi dove verranno drenati per la precipitazione. Il classificatore è rivestito con un prodotto chimico resistente alle abrasioni e all'usura prematura.

Il materiale è convogliato su uno schermo vibrante per separare il vetro da pezzi più grandi di EVA. Questa è trasportata in alto sullo schermo da l'azione vibrante ed è depositata in un altro piccolo nastro trasportatore. Il vetro cade attraverso uno scivolo, si avvia alla fase di risciacquo e viene depositato su un nastro trasportatore, dove viene sciacquato. L'eccesso di umidità è eliminato attraverso la parte inferiore del nastro.

I liquidi provenienti dalla separazione solido-liquido e dalla fase di risciacquo del vetro sono portati via da specifiche unità di pompaggio. I composti di metalli sono precipitati in tre fasi per aumentare il pH utilizzando idrossido di sodio. I precipitati sono depositati in appositi serbatoi mentre l'acqua è pompata fuori. Si realizza una torta composta dai vari metalli avviata alla trasformazione, realizzando nuovi moduli solari.

Il risultato del processo vede un recupero del 90% del vetro per il riciclo in nuovi prodotti di vetro e del 95% dei materiali semiconduttori per l'uso in un nuovo modulo solare. Nella Figura 7 si riporta il tasso di riciclo di alcuni processi per alcune principali case produttrici. Dalla figura 7, si osserva che il tasso di produttività migliore è quello dell'azienda First Solar, con un tasso pari al 93%, rispetto a quello delle altre pari all'80%.

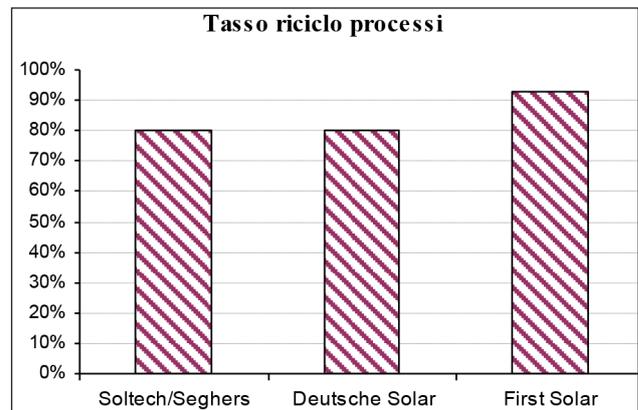


FIGURA 7 - Confronto del tasso di riciclo dei processi

CONCLUSIONI

Il presente studio ha posto in evidenza quali sono le tecnologie e i processi di riciclo dei pannelli fotovoltaici in funzione della tipologia di pannello (CIS, CIGS, α -Si, CdTe).

Si è evidenziato che le tecnologie sono in grado di produrre moduli sempre più piccoli e con minori materiali.

In termini di costo, il ricorso alla tecnica del decommissioning comporta una riduzione dei prezzi di circa il 55%, quindi questa tecnologia si dimostra estremamente conveniente, anche se è opportuno precisare che tale tecnologia ancora non è presente su vasta scala e quindi non è possibile effettuare un confronto economico reale tra le due modalità realizzative.

BIBLIOGRAFIA

1. V.M. Fthenakis, M. Fuhrmann, J. Heiser and W. Wang: Experimental investigation of emissions and redistribution of elements in CdTe PV modules during fires, 19th European PV Solar Energy Conference, Paris, France, June 7-11, 2004; Paper 5BV.1.32.
2. Vasilis M. Fthenakis: Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production, National Photovoltaic Environmental Health and Safety Assistance Center, Environmental Sciences Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973, USA.
3. Ökopol and Institute For Energetics: Material-related requirements on photovoltaic products and their disposal, Environmental Research Plan, Fkz 202 33 304, Federal Environment Agency, Referat Iii.2.5, Berlin 2004.
4. Alsema E.A., Wild-Scholten M.J.: for publication At 22. Pvsec, 3 -7, Milan, September 2007.
5. Epia, Production and market potentials towards 2011, Workshop, Frankfurt, 21 December 2006.
6. Epia, BSW- Solar: Study on the development of a take back and recovery system for photovoltaic products, 03MAP092 November 2007.
7. Bruton T.M. et al: Recycling of high value, high energy content components of silicon pv modules, 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Amsterdam, 11-15 APRIL 1994.
8. M. Felli, Lezioni di fisica tecnica, Edizioni CIRIAF, anno 2000.
9. Thumm W., Finke A., Neumeier B., Beck B., Kettrup A., Steinberg H., and Moskowitz P., Environmental and health aspects of CIS-module production, use and disposal, presented at the First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, Hawaii, 5-9 December 1994.
10. GSE. Incentivazione degli Impianti fotovoltaici. Relazione attività settembre 2007 - agosto 2008, Gennaio 2009.