

Valutazione ambientale del decommissioning di un impianto fotovoltaico

Il mercato fotovoltaico in quest'ultimi anni ha visto un rapido e sempre crescente sviluppo. Anche le problematiche relative al recupero e allo stoccaggio dei componenti degli impianti fotovoltaici sta acquisendo una sempre maggiore importanza all'interno delle diverse aziende produttrici di moduli fotovoltaici. L'attuale tipologia di moduli fotovoltaici mostra una significativa riduzione di impiego di silicio per kWp di pannello prodotto.

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF DECOMMISSIONING OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM

The PV market in the latter years has seen a rapid and an increasing development. Even the issues relating to recovery and storage components of photovoltaic systems is becoming increasingly important. Already today, the current type of photovoltaic modules shows a significant reduction in the use of silicon for each kWp panel product.

INTRODUZIONE

Il mercato fotovoltaico in quest'ultimi anni ha visto un rapido e sempre crescente sviluppo: in Italia si passerà da una presenza di 410 MW_p di potenza fotovoltaica del 2008 a una di 700 MW_p del 2009, comportando un aumento di potenza del 70%. La stima nell'arco dei prossimi 20 anni prevede fino al 2020 un tasso di crescita medio del 25%, invece per i restanti anni si prevede che il mercato potrebbe consentire la sostenibilità economica di installazioni per una potenza annua analoga a quella tedesca e cioè di 1 - 1,5 GW/anno. Secondo questo scenario alla fine del 2027, si prevede una presenza di potenza fotovoltaica di circa 20 GW_p.

In quest'ottica le diverse aziende produttrici di moduli fotovoltaici stanno, in questi anni, investendo in tecnologie e ricerca per affrontare il problema del recupero e dello stoccaggio dei componenti degli impianti fotovoltaici che si presenterà nel prossimo futuro.

In questo contesto il presente lavoro vuole presentare uno scenario dell'impatto ambientale ed economico del decommissioning degli impianti PV. Già oggi, l'attuale tipologia di moduli fotovoltaici mostra una significativa riduzione di impiego di silicio per kW_p di pannello prodotto, dovuta principalmente a un aumento delle celle e del modulo di efficienza, e a un'ottimizzazione dei fotogrammi e delle cassette di giunzione. Nell'ambito dei processi di trattamento e recupero dei moduli PV, attualmente solo due hanno una valenza di tipo industriale: 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 CdTe¹. Processi per le altre tecnologie sono in fase di sviluppo.

Questi processi di trattamento e recupero sono tecnicamente in grado di estrarre oltre il vetro, 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.

Sulla base di queste considerazioni le problematiche relative al de-

commissioning di impianti PV avranno sicuramente nei prossimi anni un carattere strategico, in quanto nell'analisi tecnica economica di un impianto PV si dovranno mettere in conto anche le spese relative allo smantellamento dello stesso a fine vita.

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 A SILICIO CRISTALLINO

- Silicio Monocristallino (c-Si)
- Silicio Policristallino (mc-Si)

MODULI A FILM SOTTILE

- Diseleniuro di indio rame gallio (CIGS)
- Silicio Amorfo (α-Si)
- Tellurio di Cadmio (CdTe)

Al fine di valutare la produzione potenziale di rifiuti derivanti dal decommissioning degli impianti fotovoltaici, che saranno installati nei prossimi vent'anni, di seguito si riporta la composizione di ciascuna tipologia di pannello e le percentuali in peso dei diversi materiali e componenti che la compongono.

c-Si (modulo in Silicio cristallino)

Nel caso di moduli fotovoltaici in silicio cristallino (c-Si), le componenti principali di cui è composto un modulo sono:

- strato di vetro temperato dello spessore di circa 3 - 4 mm;
- un supporto di film, che consiste principalmente in un foglio di PET², rivestito di PVF³ su entrambi i lati.

¹CdTe - Cadmio Tellurio

²PET - Polietilene Tereftalato

³PVF - Polivinilfluoruro

- il wafer di silicio;
- un doppio strato di EVA⁴;
- un telaio in alluminio che garantisce la planarità del modulo;
- il rapporto tra peso e la potenza del pannello PV varia dal 99 a 107 kg/kW_p.

Nella Figura 1 è riportata la percentuale di composizione di tre tipologie di moduli c-SI prodotti da tre società differenti.

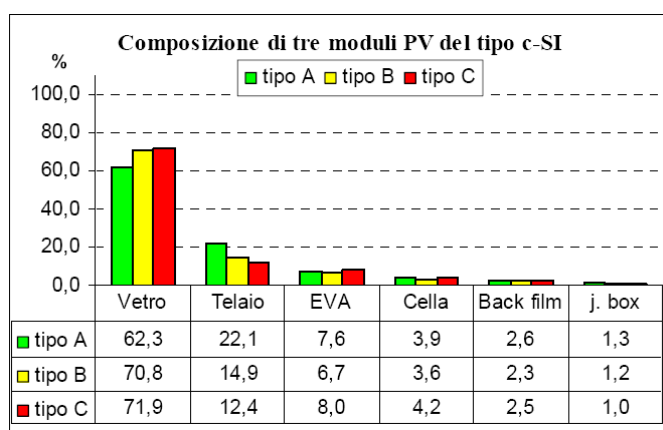


FIGURA 1 - Composizione di tre moduli c-Si

Si può osservare che mediamente la composizione dei moduli è costituita per:

- l'85% dal vetro e dal telaio: in particolare il vetro, con uno spessore che varia dai 3 ai 4 mm, è presente con una percentuale che varia tra il 60 - 70%, invece il telaio tra il 15% e 25%;
- il 4% dalle celle in silicio: tale percentuale oscilla dal 3,6% al 4,2%;
- l'1,1% dalle scatole di giunzione;
- il 7 - 8% dall'EVA.

CIGS (Copper Indium Gallium DiSelenide)

Nell'ambito dei moduli PV a film sottile la tecnologia CIGS (Copper Indium Gallium DiSelenide) è quella oggi più promettente, poiché assicura da un lato un basso costo del pannello e dall'altro un'efficienza pari a quella delle tradizionali celle di silicio. Un pannello di tipo CIGS è composto da:

- uno strato di vetro temperato;
- un supporto di film, che consiste principalmente in un foglio di PET, rivestito di PVF su entrambi i lati;
- il wafer di silicio;
- presenza di Gallio, indio e selenio;
- un doppio strato di EVA (Etilen Vinile Acetato);
- un telaio in alluminio che garantisce la planarità del modulo.

Nella Figura 2 si riportano le variazioni in peso dei diversi componenti di moduli di tipo CIGS di due diversi produttori.

Dalla figura possiamo notare come:

- l'EVA può variare da 200 a 500 g/m²;
- il materiale di giunzione varia da 400 a 100 g/m²;
- il Cu(InGa)Se occupa un peso variabile tra i 10 e 12 g/m²;
- lo ZnO ha un peso compreso tra 7 e 6 g/m²;
- il Selenio è presente con 5 o 6 g/m².

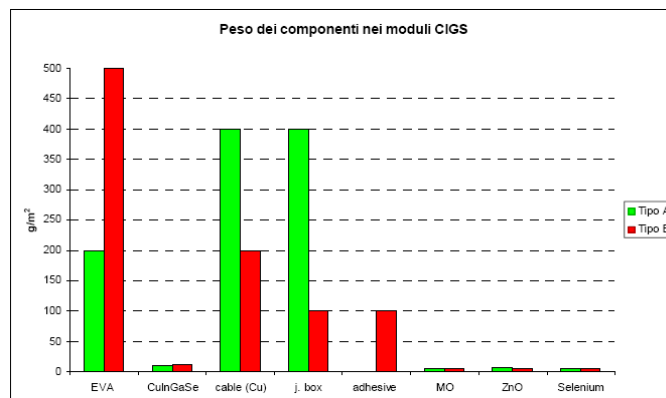


FIGURA 2 - Peso delle Composizione di due moduli CIGS

a-Si

La tecnologia costruttiva precedentemente descritta per i moduli a film sottile del tipo CIGS si applica anche per quelli tipo a-Si (silicio amorfo) nel caso in cui questi ultimi sono montati su supporto di 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'85,7%, tutti gli altri materiali, insieme, rappresentano meno dell'1%. Altri produttori di moduli a-Si utilizzano spesso per l'incapsulamento delle lamine di polimeri al posto del vetro, di conseguenza, il peso totale dei moduli è più basso.

Nella Figura 3 si riporta la composizione in massa delle diverse componenti che costituiscono un pannello a film sottile del tipo a-Si. In particolare è riportata la composizione in peso dei diversi elementi rispetto sia al modulo tipo sia alla superficie (g/m²). Dalla Figura 3 è possibile osservare che:

- il vetro ha un peso rispetto alla superficie di 12,5 g/m²;
- l'Al ha invece un peso pari a 1,6 g/m²;
- il Si 1 g/m².

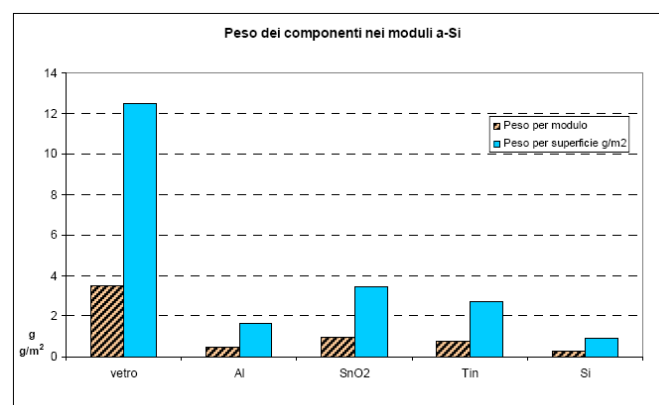


FIGURA 3 - Peso della composizione dei pannelli a film sottile del tipo a-Si rispetto al modulo e alla superficie

⁴EVA - Etilen Vinile Acetato

Oltre questi elementi un pannello fotovoltaico a film sottile a-Si contiene anche tracce di altri elementi quale il boro con un peso di $4,23 \cdot 10^{-5} \text{ g/m}^2$ e di fosforo con un peso di $4,33 \cdot 10^{-7} \text{ g/m}^2$.

CdTe

Nella Figura 4 si riporta la composizione in massa per metro quadro di superficie di un pannello fotovoltaico a film sottile del tipo CdTe. I dati relativi ai componenti accessori (quali cavi, cornici, ecc) sono stati ripresi dalla tecnologia CIS. Per quanto riguarda il materiale di incapsulamento, i produttori oggi 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.

In questi moduli il vetro nella componente del substrato e della parte frontale ha un peso pari a $7,5 \text{ g/m}^2$, mentre l'EVA ha un peso di circa 500 g/m^2 .

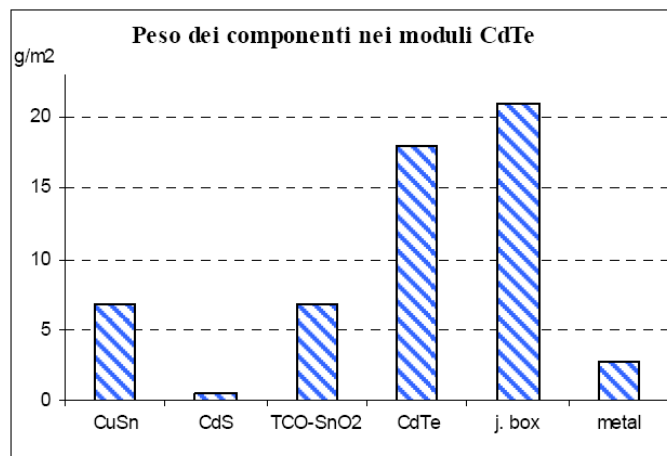


FIGURA 4 - Peso della composizione nei moduli CdTe rispetto alla superficie

Dalla figura osserviamo che il:

- CdTe ha un peso rispetto alla superficie di 17 g/m^2 ;
- CuSn ha un peso pari a circa 7 g/m^2 ;
- TCO-SnO₂ ha un peso pari a circa 7 g/m^2 ;
- junction box ha un peso di circa 21 g/m^2 .

PROCESSI E TECNICHE DI RECUPERO

I rifiuti prodotti dallo smantellamento degli impianti fotovoltaici sono strettamente correlati alla crescita del mercato fotovoltaico, per cui considerata la varietà dei moduli PV presenti sul mercato, un sistema di trattamento e riciclo deve essere capace da un lato di trattare piccole quantità di prodotti dovuti alle modeste immissioni di moduli PV prima dell'introduzione di sistemi incentivanti in conto energia, dall'altro di poter trattare elevati ed eterogenei quantitativi di rifiuti dal 2025. I processi tecnici di trattamento e recupero devono, tra l'altro, soddisfare i seguenti requisiti:

- flessibilità dei processi per raggiungere una sufficiente produzione;
- implementazione della tecnologia di riciclaggio, in combinazione

con le fasi di efficacia e di basso costo;

- minimizzare gli impatti ambientali secondari causati dai processi di trattamento e riciclaggio (emissioni, rifiuti secondari).

Attualmente sul mercato sono disponibili diverse tipologie di processi di riciclo. La First Solar ha sviluppato un processo per moduli c-SI che interessa moduli PV con una base di EVA e tedlar. I costi di questa tecnologia di riciclaggio sono pari a $0,13 \text{ \$/W}_p$, rispetto a $1,5 \text{ \$/W}_p$ necessari per la realizzazione di una nuova cella. Per completezza, aggiungiamo che attualmente i costi di trasporto dei materiali sono compresi tra $0,04$ e $0,12 \text{ \$/W}_p$, invece lo smaltimento ha costi tra compresi tra $0,01$ e $0,35 \text{ \$/W}_p$.

Un altro processo è quello sviluppato dalla Pilkington Solar International GmbH che ha portato a sviluppare un processo di recupero delle celle solari attraverso un processo di incenerimento a bassa temperatura.

Il processo di trattamento e riciclaggio ideato dalla Deutsche Solar AG consiste, invece, nella separazione dei componenti del modulo PV mediante un trattamento termico e una serie di processi meccanici. Una caratteristica di questa procedura consiste nella possibilità di recuperare i wafer intatti dai moduli fotovoltaici. Il tasso medio di riciclo è, adesso, intorno all'80%.

Con il progetto comunitario SENSE⁵ è stato sviluppato un processo di trattamento e recupero dei moduli a film sottile utilizzando processi chimici e meccanici. Dalle prove condotte su 1 kg di moduli fotovoltaici con tecnologia CIS è stato possibile recuperare:

- $0,435 \text{ kg}$ di selenio rosso
- $0,178 \text{ kg}$ di idrossido di indio
- $0,069 \text{ kg}$ di idrossido di gallio

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 risultato del processo vede un recupero del 90%. Nella Figura 5 si riporta il tasso di riciclo di alcuni processi per alcune principali case produttrici.

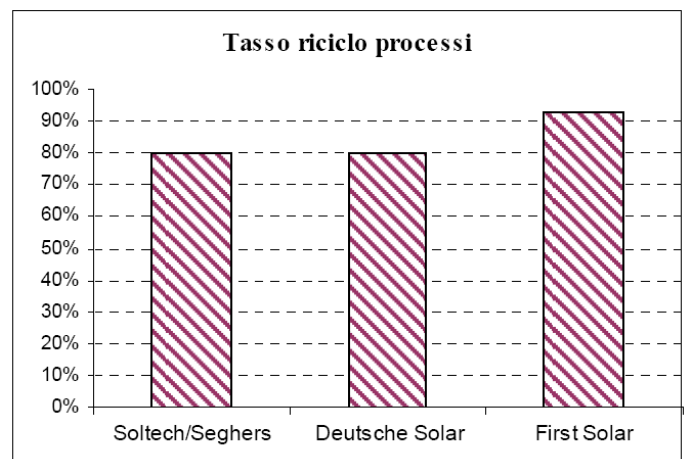


FIGURA 5 - Confronto del tasso di riciclo dei processi di trattamento e recupero

⁵Sustainability Evaluation of Solar Energy Systems

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 società pari all'80%.

PRODUZIONE DI RIFIUTI E COSTI DI SMALTIMENTO

Nei prossimi 10 anni, da molti analisti è prevista una crescita esponenziale del mercato fotovoltaico in Italia che dovrebbe posizionarsi per il 2010 al terzo posto nel mondo dopo Germania e Usa. Ai fini del nostro studio, considereremo una previsione prudentiale di sviluppo degli impianti PV in Italia: in particolare, si ritiene realistico un tasso di crescita del 25% annuo fino al 2020, invece per i successivi anni la maturazione del mercato dovrebbe consentire l'installazione di una potenza annua pari a 1,5 GW/anno.

Dai dati di espansione previsti per il mercato fotovoltaico, proviamo a ipotizzare uno scenario evolutivo delle tecnologie di produzione delle celle fotovoltaiche, per determinare i quantitativi di materiale presenti nei pannelli fotovoltaici da trattare a fine vita.

Sulla base dei suddetti scenari, andremo a delineare quali possono essere gli effetti ambientali ed economici della penetrazione della produzione di energia elettrica attraverso la conversione fotovoltaica dell'energia solare.

Per quanto riguarda i pannelli di tipo c-Si, si ipotizzano valori massimi a partire dal 2040, periodo in cui si registra un incremento di potenza installata. In particolare, per tale periodo, si prevede che dovranno essere trattati e riciclati:

- 64.174,3 t di vetro;
- 18.992,4 t di Al;
- 10.995,6 t di materiale organici;
- 3.998,4 t di Si;
- 599,8 t di Cu.

Per i pannelli di tipo CIGS si osserva che si prevede un aumento dei materiali a partire dal 2036, periodo in cui si registra un incremento di potenza installata. In particolare, per tale periodo, si prevede che dovranno essere trattati e riciclati:

- 9.756,2 t di vetro;
- 1.447,7 t di Al;
- 723,8 t di materiale organici;
- 102,5 t di Cu.

Per la tipologia a-Si, si osserva che si prevede un aumento dei materiali a partire dal 2037, periodo in cui si registra un incremento di potenza installata. In particolare, per tale periodo, si prevede che dovranno essere trattati e riciclati:

- 38.383 t di vetro;
- 5.374,5 t di Al;

- 895,8 t di materiale organici;
- 102,5 t di Cu;
- 44,8 t di Sn;
- 44,8 t di Pb.

Per i pannelli di tipo CdTe si osserva che si prevede un aumento dei materiali a partire dal 2036, periodo in cui si registra un incremento di potenza installata. In particolare, per tale periodo, si prevede una presenza di:

- 7.145 t di vetro;
- 5.374,5 t di Al;
- 262,1 t di materiale organici;
- 67,4 t di Cu;
- 5,2 t di Te;
- 5,2 t di Cd.

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., Ketrup 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.