

# BALANCE OF SYSTEM

IL PANNELLO FV DISMESSO PUÒ ESSERE TRATTATO COME RIFIUTO ELETTRONICO E SMALTITO IN DISCARICA O INCENERITO, CONTRIBUENDO COSÌ A UN AUMENTO ESPONENZIALE DEI RIFIUTI, OPPURE DIVENTARE PARTE INTEGRANTE DI UN PROCESSO PRODUTTIVO SOSTENIBILE, "CICLICAMENTE CHIUSO E VIRTUOSO" SE REINTRODOTTO TOTALMENTE SUL MERCATO CON LE MEDESIME FUNZIONI O SE PARZIALMENTE CON UTILIZZAZIONI DIFFERENTI

## QUANDO (ANCHE) IL FOTOVOLTAICO MUORE

Indagini sul ciclo e sul fine vita della componentistica fotovoltaica in chiave di strategia sostenibile

di Fabio Minutoli

La tecnologia solare fotovoltaica ha conosciuto nel corso dell'ultimo decennio una straordinaria, e per certi versi inaspettata, diffusione a livello globale come evidenziato nel report dall'European Photovoltaic Industry Association (EPIA): gli impianti installati nel 2015 superano la potenza di 59 GW con un incremento del 34% rispetto al 2014. Le previsioni future del GTM Research e del Brookhaven National Laboratory confermano che tale crescita potrebbe generare una domanda superiore alla produzione con difficoltà, non nell'immediato, nell'approvvigionamento di moduli, a beneficio di poche industrie asiatiche che controllerebbero da sole l'intero mercato fotovoltaico. Diventa quindi indispensabile interrogarsi, per ragioni legate sia alla mitigazione dell'impatto ambientale sia alla reperibilità della materia prima, sull'intero ciclo di vita e sul possibile riciclo (è necessario fare attenzione sull'intento di voler "riciclare" e non "riusare" la componentistica fotovoltaica: in accordo con la Direttiva 2008/98/CE il riciclo consiste in operazioni di recupero di materiali successivamente trattati per ottenere prodotti o sostanze da utilizzare per la loro funzione originaria o per altre; il riuso, differentemente, non prevede alcun tipo di trattamento del materiale recuperato ma semplici ope-

razioni di controllo, pulizia e riparazione prima del reimpiego sul mercato), nella fase *end of life*, della componentistica fotovoltaica.

Il pannello FV, elemento che con il suo peso incide per oltre il 70% nella composizione del Balance of System (costituito da inverter, cavi, strutture di sostegno, ...), una volta dismesso può essere trattato come rifiuto elettronico e smaltito in discarica o incenerito, contribuendo così ad un aumento esponenziale dei rifiuti, oppure diventare parte integrante di un processo produttivo sostenibile, "ciclicamente chiuso e virtuoso" sia se reintrodotta totalmente sul mercato con le medesime funzioni sia parzialmente con utilizzazioni differenti. Affinché l'intero ciclo sia sostenibile è necessario verificare che l'energia prodotta dall'impianto durante il suo impiego sia convenientemente superiore a quella consumata nelle fasi di fabbricazione, di trasporto, di installazione, di dismissione e di recupero. Gli studi LCA affrontati in letteratura si soffermano nella maggior parte dei casi ad analizzare esclusivamente la fase di fabbricazione delle celle fotovoltaiche, la più energivora, trascurando, per mancanza di dati, le altre.

L'analisi della letteratura di settore, di alcuni contributi internazionali presenti nelle banche dati ORCID e Scopus, di

articoli presenti nelle riviste scientifiche *Renewable and Sustainable Energy Reviews* e *Energy and Buildings* dell'ultimo decennio, ha permesso di constatare come non siano sempre univoci, a parità di condizioni al contorno e tecnologia, i dati che determinano l'Energy Payback Time (EPBT) - il tempo in anni che il sistema FV impiega a generare l'equivalente ammontare di energia consumata durante l'intero ciclo di vita del sistema stesso - e l'Energy Return On energy Invested (EROI) - la quantità di energia che si ottiene da una fonte rinnovabile rispetto a quanta se ne richiede per creare e mantenere il sistema.

I valori di energia incorporati nei moduli, riscontrati nelle trattazioni analizzate, sono infatti eccessivamente disomogenei: al variare dell'efficienza

**AFFINCHÉ  
L'INTERO CICLO  
SIA SOSTENIBILE  
È NECESSARIO  
VERIFICARE  
CHE L'ENERGIA  
PRODOTTA  
DALL'IMPIANTO  
DURANTE  
IL SUO IMPIEGO SIA  
CONVENIENTEMENTE  
SUPERIORE  
A QUELLA  
CONSUMATA  
NELLE FASI  
DI FABBRICAZIONE,  
DI TRASPORTO,  
DI INSTALLAZIONE,  
DI DISMISSIONE  
E DI RECUPERO**

| Modulo   | Si monocristallino        |                         | Si policristallino        |                         | Film sottili              |                         |
|--|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
|  | Fthenakis e Alsema (2006) | De Wild Scholten (2009) | Fthenakis e Alsema (2006) | De Wild Scholten (2009) | Fthenakis e Alsema (2006) | De Wild Scholten (2009) |
| Dati del                                       | 2004-05                   | 2008                    | 2004-05                   | 2008                    | 2004-05                   | 2008                    |
| Efficienza                                     | 14%                       | 14%                     | 13.2%                     | 13.2%                   | 11.5%                     | 13.2%                   |
| Spessore cella                                 | 300 µm                    | 180 µm                  | 285 µm                    | 200 µm                  | 315 µm                    | 190 µm                  |
| Produzione (MJ <sub>p</sub> /m <sup>2</sup> )  | 5000                      | 2900                    | 3700                      | 2700                    | 2300                      | 1550                    |
| End of life (MJ <sub>p</sub> /m <sup>2</sup> ) | -                         | 357                     | -                         | 357                     | -                         | 357                     |
| Totale (MJ <sub>p</sub> /kW <sub>p</sub> )     | 40000                     | 26000                   | 29600                     | 24450                   | 18400                     | 15250                   |

Dati energia richiesta durante il ciclo di vita di un m<sup>2</sup> di moduli FV (Fthenakis et al., 2009).

| Componente modulo | Quantità Peso                               | % recuperabile kg/W <sub>p</sub> recuperati | €/kg costo | Ricavi 250 W <sub>p</sub> |
|-------------------|---|---|------------|---------------------------|
| Vetro             | 74.16 %<br>0.0593 kg/W <sub>p</sub>         | 95-97<br>0.05693 kg/W <sub>p</sub>          | 0.05-0.06  | 0.783 €                   |
| Alluminio         | 10.30 %<br>0.0083 kg/W <sub>p</sub>         | 100<br>0.0083 kg/W <sub>p</sub>             | 1.20-1.29  | 2.580 €                   |
| EVA               | 6.55 %<br>0.0068 kg/W <sub>p</sub>          | 100<br>0.0068 kg/W <sub>p</sub>             | -          | recupero energetico       |
| Cella             | 3.48 %<br>0.0028 kg/W <sub>p</sub>          | 65-85<br>0.0021 kg/W <sub>p</sub>           | variabile  | variabile                 |
| Tedlar            | 3.60 %<br>0.0038 kg/W <sub>p</sub>          | 100<br>0.0038 kg/W <sub>p</sub>             | -          | recupero energetico       |
| Rame              | 0.57 %<br>0.00046 kg/W <sub>p</sub>         | 78<br>0.00036 kg/W <sub>p</sub>             | 4.5        | 0.404 €                   |
| Silicio           | 0.03%<br>0.00003 kg/W <sub>p</sub>          | 75-85<br>0.000024 kg/W <sub>p</sub>         | 1.86       | 0.012 €                   |
| Argento           | 0.004-0.006 %<br>0.000004 kg/W <sub>p</sub> | 60<br>0.0000024 kg/W <sub>p</sub>           | 300-400    | 0.210 €                   |
| Stagno            | 0.12%<br>0.0001 kg/W <sub>p</sub>           | 60<br>0,00006 kg/W <sub>p</sub>             | 15-18      | 0.247 €                   |
| Piombo            | 0.07%<br>0.000056 kg/W <sub>p</sub>         | 60<br>0,000034 kg/W <sub>p</sub>            | 1.50-1.54  | 0.013 €                   |

I dati si riferiscono alle percentuali in peso dei componenti presenti in un modulo in silicio policristallino e il peso di ogni componente per ogni watt di picco.



| Lavorazioni             | Energia impiegata per moduli nuovi | Energia impiegata per moduli riciclati |
|-------------------------|------------------------------------|--|
| Produzione wafer        | 366-426 kWh                        | -                                      |
| Processo di riciclaggio | -                                  | 108-114 kWh                            |
| Produzione cella        | 59-78 kWh                          | 59-79 kWh                              |
| Assemblaggio modulo     | 45-54 kWh                          | 45-54 kWh                              |
| Energia totale          | 470-558 kWh                        | 212-247 kWh                            |
| Energia prodotta        | 300 kWh/anno                       | 300 kWh/anno                           |
| EPBT                    | 1.6-1.9 anni                       | 0.7-0.8 anni                           |

Dalla produzione del wafer in silicio al riciclo: confronto energetico tra le fasi di lavorazione.

delle celle, dell'irradiazione solare, della performance ratio, della tecnologia di produzione del feedstock di silicio, del possibile riciclo, si hanno per i pannelli in silicio monocristallino valori di energia incorporata compresi tra 1827 MJ/m<sup>2</sup> e 14.224 MJ/m<sup>2</sup>, in policristallino tra 1069 MJ/m<sup>2</sup> e 9303 MJ/m<sup>2</sup>, in film sottile tra 894 MJ/m<sup>2</sup> e 4125 MJ/m<sup>2</sup>. Tali differenze, così sostanziali (ma intuibili se si pensa che il variare della sola tecnologia di purificazione del silicio, Siemens modificata-Reattore a letto fluido-Processo metallurgico, causa differenti fabbisogni di energia primaria, 1070-500-300 MJ/kg), determinano valori di EPBT variabili tra 1.0 e 4.1 e di EROI compresi tra 8.7 e 34.2. In tabella in alto nella pagina a fianco, i risultati presentati nel 2009 da Vasilis Fthenakis, Direttore del Center for Life Cycle Analysis, e da altri studiosi sulla più probabile energia richiesta durante l'intero ciclo di vita di 1 m<sup>2</sup> di moduli in silicio monocristallino, multicristallino e film sottili, nell'ipotesi che 8 m<sup>2</sup> producano una potenza di 1 kWp. Inoltre il numero limitato di effettive dismissioni di impianti e le ancora più esigue esperienze di riciclaggio non consentono di determinare con precisione l'energia associabile al fine vita del modulo. L'analisi comparativa, aggiornata al 2016 (tabella nella pagina a fianco), dei pochi risultati sulle esperienze di riciclo presentati in letteratura (dismissione impianti di Pellworm, in Germania, e di Chevetogne, in Belgio) e dei dati forniti da Bio intelligence Service 2011, ha comunque consentito di determinare un plausibile scenario delle percentuali di materiale recuperabile e i ricavi economici per moduli in silicio policristallino di 250 Wp e peso di 17-21 kg installati su tetti.

Appare quindi necessario riciclare non solo quei materiali che incidono maggiormente sul peso complessivo dei moduli, come vetro e alluminio, ma anche e soprattutto i wafer di silicio, in peso meno rilevanti ma i più energivori nella fase di produzione.

Qualora i wafer recuperati fossero privi di rotture possono, senza ulteriori processi di lavorazione e purificazione, essere riutilizzati per la produzione di nuovi moduli cristallini; nel caso di wafer danneggiati, non potendo essere allo stato attuale riutilizzati, vengono riciclati per ricavare materia prima secondaria, in quanto non ottenuta a partire dalla materia prima vergine, impiegata per produrre nuovi lingotti senza subire il processo di purificazione.

Per la fase di recupero dei moduli pos-

sono utilizzarsi processi termici o meccanici: tra i più conosciuti quello della Deutsche Solar per i moduli in silicio cristallino e della First Solar per i moduli al CdTe; merita attenzione il sistema di riciclo italiano, con consumi elettrici assai ridotti, della Sea Ecoservizi, in cui il modulo passa prima attraverso una devetratrice che separa meccanicamente la componente vetrosa, per essere poi sottoposto ad un processo meccanico a temperature controllate in cui vengono separati i restanti materiali. In funzione dei dati forniti da PV-cycle, Associazione Europea per il ritiro e riciclo di moduli FV, i costi di riciclo e trattamento variano tra 130-170 €/ton e diminuiranno all'aumentare delle tonnellate di moduli da smaltire.

A questi bisogna però aggiungere i costi di gestione dell'impianto di riciclaggio (manutenzione, personale) e la rata annuale di ammortamento dell'investimento effettuato per la realizzazione dell'impianto: i dati reperiti stimano che tali valori siano tra 1300-1500 €/ton.

Compresa l'importanza del riciclo dei moduli a fine vita bisogna confrontarsi con una serie di operazioni preventive che lo consentano: raccolta e trasporto dei moduli i cui costi sono stimati in circa 150-180 €/ton.

La dispersione geografica dei moduli sul territorio, le perplessità sul responsabile del conferimento al riciclaggio (bring in, se il proprietario dell'impianto; pick up, se un sistema logistico), le differenti destinazioni dei moduli dismessi (direttamente all'impianto di trattamento o a centri di raccolta intermedi), la bassa concentrazione di materiali pregiati e il lungo lasso di tempo tra le fasi di installazione e dismissione, non favoriscono di certo la filiera delle operazioni di riciclo.

Anche la carenza di una specifica normativa europea relativa al recupero dei moduli e la stessa contrassegnazione della componentistica fotovoltaica come RAEE (Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) di fatto non hanno regolamentato né programmato la corretta gestione della fase *end of life*. Inoltre la stessa Commissione Europea nel 2011 ha espresso lo svantaggio economico nel riciclaggio dei pannelli FV in quanto i volumi di rifiuti generati sono ancora troppo piccoli.

A distanza di anni e in previsione di un aumento sempre più sostanziale dei rifiuti è possibile affermare che il recupero costituisca un effettivo e unico potenziale di risparmio di risorse primarie, energetiche ed economiche.

I differenti valori analizzati, relativi

all'energia immagazzinata dai moduli, non consentono di giungere a risultati assoluti ma è comunque possibile fare un confronto energetico, sulla base dei dati riportati da Müller nel 2006 adeguati ai valori attuali di mercato (tabella nella pagina a fianco), fra i valori di EPBT ricavati per moduli costruiti con wafer nuovi e con wafer riciclati. Anche in questo caso si è scelto un modulo in silicio policristallino da 250 Wp, condizioni di radiazione solare 1600 kWh/m<sup>2</sup>anno, performance ratio 0,75, vita utile 20-25 anni. Il confronto è indiscutibilmente a vantaggio dei moduli ottenuti attraverso il riciclo, il cui impiego consente un risparmio energetico complessivo superiore al 50% e un conseguenziale dimezzamento dell'EPBT, senza contare i vantaggi ambientali dovuti ad un abbattimento del volume dei rifiuti ed un risparmio nell'approvvigionamento delle materie prime.

Allo stato attuale l'esiguo numero di moduli dismessi rimanda a tempi futuri il dibattito sull'opportunità del riciclo quando la quantità dei moduli sarà tale da diventare un serio problema.

Fabio Minutoli

Università di Messina - Dipartimento di Ingegneria

**IL NUMERO  
LIMITATO DI  
EFFETTIVE  
DISMISSIONI  
DI IMPIANTI  
E LE ANCORA  
PIÙ ESIGUE  
ESPERIENZE DI  
RICICLAGGIO NON  
CONSENTONO  
DI DETERMINARE  
CON PRECISIONE  
L'ENERGIA  
ASSOCIABILE AL  
FINE VITA DEL  
MODULO**