

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA GESTIONALE

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA, AMBIENTALE E DEI
MATERIALI*

TESI DI LAUREA

in

Valorizzazione delle risorse primarie e secondarie

**VALUTAZIONI TECNICO-AMBIENTALI PER LA
GESTIONE SOSTENIBILE DI UN IMPIANTO
FOTOVOLTAICO**

RELATORE:

Prof. Alessandra Bonoli

CANDIDATA:

Irene Callegati

Anno Accademico 2013-2014

Sessione III

Vorrei dedicare un pensiero particolare a tutti coloro che mi hanno sostenuto nella realizzazione di questo lavoro.

Innanzitutto desidero ringraziare la Professoressa Bonoli per i preziosi insegnamenti da lei offerti nel corso dei miei studi.

Ringrazio Andrea, che non mi ha mai fatto mancare supporto e fiducia lungo il mio percorso universitario, ringrazio la mia coinquilina e compagna di canto Francesca, la mia amica e compagna di viaggi Giulia, i concerti dei Verdena, la discografia degli Stone Roses, la felpa degli Oasis, il Sabor Latino e il cibo cinese.

Rivolgo un ringraziamento speciale a mia sorella Silvia e mio fratello Nicola, i quali hanno saputo accudirmi amorevolmente durante la mia crescita, riempiendo la casa di Carraie di buona musica e film d'autore.

Ma soprattutto desidero dedicare questo elaborato ai miei genitori Alma e Veniero, la cui bontà e forza d'animo sono da sempre per me fonte di profonda ammirazione.

INDICE

INTRODUZIONE	9
CAPITOLO I - IL SISTEMA FOTOVOLTAICO	19
1. Nozioni generali	19
1.1 Descrizione impianti fotovoltaici	19
1.2 Parametri tecnici	22
1.3 Classificazioni e tipologie d'impianti	24
2. Tipologie di pannelli solari	27
2.1 Tecnologie fotovoltaiche	27
2.2 Nuove generazioni di pannelli fotovoltaici	30
3. Funzionamento, processi di drogaggio e architettura dei moduli	32
3.1 Effetto fotoelettrico	32
3.3 Dipendenza dei parametri di una cella fotovoltaica	35
3.4 Metodi di drogaggio dei wafer di silicio	35
3.4.1 Diffusione	35
3.4.2 Crescita epitassiale	36
3.4.3 Impiantazione ionica	37
3.5 Formazione delle giunzioni p-n	38
3.5.1 Sovracompensazione	38
3.5.2 Diffusione in oro	38
3.5.3 Tecnologia planare	39
3.6 Struttura del modulo fotovoltaico in silicio	39
3.7 Prestazioni nel tempo dei moduli	41
4. Sistemi di accumulo, inverter e l'assetto SEU	42
4.1 Batterie di accumulo per impianti fotovoltaici	43
4.1.1 Tipologie di sistemi di accumulo	43
4.1.2 Vantaggi offerti da un sistema a batterie	46
4.1.3 Benefici garantiti in un impianto domestico	47
4.2 Inverter fotovoltaici	48
4.2.1 Inverter per immissioni in rete	48
4.2.2 Funzionalità garantite da un inverter	49
4.2.3 Classificazioni degli inverter	50
4.2.4 Dimensionamento dei componenti	50
4.2.5 Micro inverter	51
4.3 Sistemi SEU	52

CAPITOLO II - POLITICA AMBIENTALE E CONTESTO NORMATIVO.....	55
1. Il ruolo del Governo nella tutela ambientale	55
1.1 Strumenti di politica ambientale.....	56
1.2 Programmi europei	59
1.3 Società e Consorzi	60
1.4 Previsioni di mercato.....	61
2. Decreti e norme emanate	63
2.1 Direttiva RAEE	63
2.1.1 Tipologie di rifiuti fotovoltaici	67
2.2 Revisione RoHS	70
2.2.1 Discussioni sui pannelli di tellururo di cadmio	71
2.3 Conto Energia.....	71
2.3.1 Come funzionano gli incentivi	72
2.3.2 Fine degli incentivi	73
2.3.3 Caso fotovoltaico in Sicilia.....	74
2.3.4 Recupero di investimento	75
2.3.5 Occupazione di territori agricoli.....	76
2.4 Decreto competitività	78
2.5 Misure antidumping.....	80
2.6 Delibera Sistemi di accumulo.....	80
3. Conferenze e convegni annuali	83
CAPITOLO III - VERSO UNA GESTIONE SOSTENIBILE DEI PANNELLI FOTOVOLTAICI ...	85
1.1 Analisi LCA.....	87
1.1.1 Ecodesign	88
1.2 Sostenibilità del mercato fotovoltaico	91
1.2.1 Fattori di criticità	93
2. LCA applicata agli impianti fotovoltaici.....	95
2.1 Costruzione dei pannelli fotovoltaici.....	96
2.1.1 Preparazione del Silicio	98
2.1.2 Purificazione del Silicio.....	99
2.1.3 Crescita dei lingotti monocristallini.....	102
2.1.4 Consumo energetico speso per la produzione	104
2.1.5 Costi da sostenere	105
2.2 Produzione di energia elettrica	107
2.2.1 Studi sulla convenienza del fotovoltaico	107
2.2.2 Promotori di tecnologie sempre più performanti.....	108

2.2.3 Analisi dei prezzi	111
2.3 Smaltimento dei pannelli fotovoltaici.....	112
2.3.1 Benefici derivabili dal riciclo	114
2.3.2 Fattibilità economica del riciclaggio	115
2.4 Progetti di ricerca.....	117
3. Il raggiungimento della <i>grid parity</i>	119
3.1 Studi di grid-parity.....	120
4. Sopravvivenza del settore fotovoltaico	124
4.1 Investire nel fotovoltaico	126
4.1.1 Il contributo fornito dai SEU	127
4.1.2 Competitività offerta dai sistemi di accumulo.....	128
4.1.3 L'adozione di batterie di accumulo	130
4.2 Calcolo del Rendimento Fotovoltaico	132
CAPITOLO IV - PROCESSI DI TRATTAMENTO PANNELLI FOTOVOLTAICI DISMESSI	135
1. Gerarchia di gestione dei rifiuti.....	135
1.1 Smaltimento previsto per i RAEE	138
2. Trattamento dei moduli fotovoltaici dismessi	141
2.1 Necessità e vantaggi derivabili dal trattamento dei moduli.....	144
2.2 Soluzioni di riciclaggio più comuni.....	149
2.2.1 Il trattamento First Solar.....	152
2.2.2 Il trattamento Deutsche Solar	153
2.2.3 Lo smaltimento operato da Sea Ecoservizi.....	156
3. Supporto di consorzi e associazioni no-profit	157
4. Sviluppo di nuovi programmi di ricerca.....	161
4.1 Progetto SunMeet	162
4.2 Progetto di ricerca Photolife	163
4.3 Progetto Full Recovery End Life Photovoltaic.....	164
4.4 Dispositivo mobile per il riciclo dei pannelli fotovoltaici	167
4.5 Rendere l'industria fotovoltaica "doppiamente verde"	167
CONCLUSIONI.....	169

INTRODUZIONE

Un tema che sta destando sempre più attenzione in ambito industriale, politico e sociale è quello emerso della possibilità di produzione energetica da fonti rinnovabili. Attualmente la nostra richiesta di energia dipende fortemente dallo sfruttamento dei combustibili fossili, quali petrolio e carbone, le cui disponibilità sempre più limitate e gli impatti negativi da essi generati sull'ambiente circostante stanno suscitando allarmi e preoccupazioni. Risulta quindi sempre più sentito il problema dell'imminente esaurimento dei giacimenti fossili, e il progressivo aumento della domanda di energia non fa che rendere la situazione ancora più precaria, provocando l'aumento dei prezzi e rendendo queste fonti sempre meno accessibili. Questa consapevolezza e la maggiore sensibilità verso le tematiche ambientali stanno favorendo lo sviluppo di sistemi di approvvigionamento alternativi, dando risalto alle fonti rinnovabili. Con quest'ultimo termine si intende le forme di energia derivanti da risorse naturali, la cui caratteristica intrinseca è quella di rigenerarsi almeno alla stessa velocità con cui vengono consumate, tanto da poter essere considerate "non esauribili". Inoltre si trattano di energie pulite, poiché durante il loro utilizzo non provocano l'immissione in atmosfera di sostanze inquinanti e dannose per l'ambiente, quale ad esempio CO₂. Esse costituiscono la base per lo sviluppo di un'economia verde.

Appare quindi possibile ricorrere a una gestione di tipo sostenibile delle risorse che, secondo un'ottica complessiva, intende aumentare la loro efficienza di sfruttamento e ridurre l'impatto ambientale generato in ogni fase del loro ciclo di vita. Infatti un prodotto provoca interazioni con l'ambiente circostante non soltanto durante il suo utilizzo, su cui si tende a focalizzare principalmente l'attenzione generale, ma anche durante l'estrazione, il processamento, la distribuzione e la gestione finale degli output

prodotti, come rifiuti ed emissioni in aria o acqua. Solo valutando e intervenendo su tutti questi aspetti in una prospettiva generale si può parlare di “risorsa verde”. Questa tipologia di analisi è resa possibile dalla metodologia LCA (Life Cycle Assessment), la quale consente di stimare gli impatti ambientali di un prodotto o servizio derivanti da tutte le fasi della sua vita e sulla base delle quali individuare le criticità ambientali, al fine di apportare miglioramenti al prodotto.

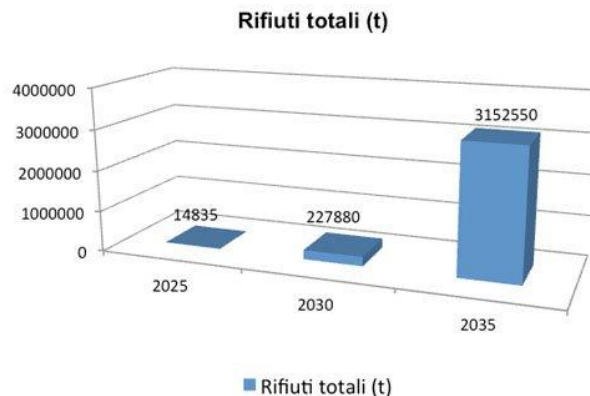
Sono da considerarsi fonti di risorse rinnovabili di tipo energetico l’irraggiamento solare, il vento, le correnti marine e le precipitazioni meteoriche. Questo lavoro intende concentrarsi sul potenziale offerto dallo sfruttamento dell’energia derivata dal sole tramite l’installazione di impianti fotovoltaici, i quali permettono la conversione della radiazione solare incidente sulla superficie dei pannelli in energia elettrica.

L’energia fotovoltaica è al giorno d’oggi considerata la più promettente e versatile tra le fonti rinnovabili. L’impiego di celle fotovoltaiche permette di sfruttare una risorsa inesauribile quale il sole ed è caratterizzata dall’assenza di emissioni in atmosfera durante il processo di conversione (e da un impatto ambientale complessivo ridotto). I vantaggi ambientali rispetto ai comuni sistemi di generazione basati su combustibili fossili sono indiscutibili. Un’installazione fotovoltaica è essenzialmente un impianto elettrico costituito dall’assemblaggio di più moduli, i quali sfruttano l’energia solare incidente e, tramite effetto fotovoltaico, permettono la produzione di energia elettrica. È dotato della necessaria componente elettronica, come cavi e inverter, al fine di garantire l’efficienza di tale conversione. Attualmente sul mercato la tecnologia più diffusa prevede moduli fotovoltaici in silicio mono o poli-cristallino, caratterizzati da elevati valori di rendimento. Il silicio, nonostante non si trovi libero in natura, è l’elemento più diffuso sulla Terra dopo l’ossigeno e risulta ampiamente sfruttabile. Dopo le prime installazioni risalenti agli anni ’90 durante il 2010 e 2011 si è assistito a un improvviso “boom” delle produzioni fotovoltaiche, il quale ha permesso lo sviluppo di una catena produttiva industrialmente robusta, garantendo di conseguenza l’adozione di economie di scala e un costo finale relativamente ridotto e competitivo. L’industria fotovoltaica è cresciuta in media di oltre il 40% l’anno, mentre i costi di installazione sono diminuiti di circa il 60% secondo le stime del rapporto redatto dal Centro comune di ricerca della Commissione europea. Durante quegli anni l’Europa ha

installato più del 63% di tutti gli impianti nel mondo, guadagnandosi la fama di “leader mondiale nella distribuzione solare”. In particolare la Germania da sola ha contribuito con il 27% della quota mondiale. Il mercato del fotovoltaico è stato quindi caratterizzato da una forte espansione, nonostante le incertezze normative in merito, e prosegue tuttora. Le installazioni mondiali sono passate dai 30 GW nel 2012 ai 38,3 GW nel 2013. La diffusione di questa tecnologia appariva fino a qualche anno fa confinata in un ristretto numero di nazioni e l’Unione Europea, come abbiamo già menzionato, ricopriva un ruolo dominante. In particolare a livello mondiale il mercato del silicio era in mano a pochi grandi multinazionali, le quali hanno detenuto il dominio assoluto delle forniture. L’aumento delle quantità prodotte di tecnologie fotovoltaiche ha determinato in seguito la graduale apertura del mercato, con una conseguente diminuzione dei prezzi. Grazie a queste condizioni favorevoli si sta vivendo una progressiva “globalizzazione” della tecnologia, testimoniata dallo sviluppo di nuovi mercati come India, Corea, Thailandia, ecc. Questo avvio significativo verso il fotovoltaico risulta già consolidato in Germania, Asia e negli Usa. In ambito europeo nel 2013 la Germania detiene ancora il suo primato nella produzione, seguita da Gran Bretagna e Italia.

I dati raccolti circa il quantitativo di fotovoltaico e di potenza generata fino a oggi appaiono stimolanti per indirizzare la produzione verso una valida energia alternativa rinnovabile, ma cela da un lato un problema che, nonostante appaia lontano, deve essere considerato sin da oggi: la questione dello smaltimento degli impianti fotovoltaici. Di fatto la vita stimata dei pannelli è compresa tra 50 e 100 anni, tuttavia la vita utile dei moduli entro il quale sono in grado di produrre il massimo dell’energia prevista è di circa 25-30 anni. Questa valutazione ci porta sin da subito a dover considerare gli scenari dei prossimi decenni. Il problema appena esposto è infatti tutt’altro che indifferente calcolando che fino a oggi sul territorio italiano si contano 100 milioni di moduli fotovoltaici. Se prima, quindi, risultava una tematica meno sentita, anche a causa della giovane età della tecnologia fotovoltaica e della sua lunga durata, oggi si avverte la necessità di individuare tempestivamente una soluzione efficace per affrontare la questione della dismissione dei pannelli e del loro relativo smaltimento. Considerando i rifiuti prodotti in questi anni e ipotizzando un fine vita

utile stimato nel 2035 si prevede una produzione totale di 30.000 MW di rifiuto derivante da componenti fotovoltaiche.



Quantità di rifiuti prevista per i prossimi anni

Universalmente il solare fotovoltaico viene stimato come una tecnologia verde che, tuttavia, abbiamo appena dimostrato può celare aspetti negativi nel caso si attui una gestione sconsiderata e irresponsabile dei rifiuti prodotti. L'urgenza del problema ambientale e i rischi correlati a una cattiva gestione del fine vita degli impianti sta costringendo i produttori ad attrezzarsi alla ricerca di metodi di riciclaggio e smaltimento sostenibile dei moduli una volta che hanno raggiunto il termine della loro vita utile. I primi segnali positivi provengono dalla Germania, la quale ha intrapreso attività di sviluppo e percorsi di riciclaggio grazie anche alla collaborazione dell'associazione europea PV Cycle, costituita dai più grandi produttori di pannelli solari, il cui obiettivo è rendere il processo di riciclaggio degli impianti economicamente interessante ed ecologicamente responsabile. Essa intende introdurre una gestione complessiva di rifiuti, comprensiva di ritiro e riciclaggio volontario. Le varie attività affrontate potranno incoraggiare altri mercati, come quello statunitense e giapponese, ad adottare politiche simili. Quindi, anche se attualmente le soluzioni per il recupero e riciclo non risultano ancora ben sviluppate e praticabili, in futuro diventeranno una necessità che andrà a costituire una sfida per il settore fotovoltaico. L'incremento della domanda di riciclaggio, conseguente alla crescita del numero di installazioni di questi ultimi anni, garantisce l'incoraggiamento allo sviluppo di filiere dedicate al trattamento e il recupero dei materiali da reimpiegare in nuovi processi produttivi futuri. La quantità dei rifiuti derivanti dai pannelli fotovoltaici risulta proporzionale alla crescita della potenza installata. L'operazione di riciclaggio diviene

dunque un'attività sempre più attrattiva man mano che si accumulano i volumi di prodotto fotovoltaico da trattare. Inoltre appare fondamentale che il fotovoltaico si affermi sempre più come una risorsa energetica, oltre che fonte di energia pulita, essendo possibile il recupero di materiali preziosi dal trattamento di riciclo.

Il contributo energetico garantito dal fotovoltaico appare cresciuto in modo significativo negli ultimi dieci anni. Ad esempio in Italia esso costituisce oggi il 7% del fabbisogno elettrico nazionale totale. Nella relazione "Collegamento al sole" del febbraio 2012 delineata da EPIA, associazione dell'industria fotovoltaica europea rappresentante dei membri attivi lungo l'intera catena degli affari del fotovoltaico, si prevede che in un contesto di calo dei prezzi entro il 2030 la tecnologia fotovoltaica costituirà il pilastro del mercato elettrico europeo, stimando una quota del settore solare del 25-30%. Il rapporto ritiene che l'Unione Europea dovrebbe tener conto del ruolo che giocherà il fotovoltaico nel mix energetico e invitare gli Stati membri a coordinare le politiche energetiche per favorire la flessibilità della rete elettrica su scala europea. Secondo EPIA almeno fino al 2020 non sussiste una problematica di quantità di energia prodotta in Europa: la potenza installata risulta sufficiente. Occorre invece aggiornare le regole del mercato e le infrastrutture tecniche in modo da garantire l'integrazione in grandi dimensioni del fotovoltaico sulla rete elettrica. Nell'Unione Europea non si soffre quindi di una mancanza di centrali elettriche, ma di flessibilità del sistema elettrico capace di rendere più disponibile la capacità di generazione. Recentemente nei paesi industrializzati si sono affermati nuovi strumenti di politica ambientale, rappresentati dagli accordi volontari. Essi costituiscono degli strumenti flessibili che bene si adattano all'applicazione in ambito industriale e risultano favoriti da una diffusa insufficienza di tradizionali strumenti regolamentativi, che spesso caratterizza diverse tematiche ambientali. Questi accordi siglano una cooperazione tra pubblica amministrazione e imprese, e stanno incontrando sempre maggior consenso.

A fronte di questa crescita apparentemente inarrestabile dell'impiego del fotovoltaico un ruolo di estrema importanza è ricoperto dal governo, il quale deve essere in grado di gestire questa diffusione, in modo che sia apprezzata dai suoi utilizzatori, e agire al fine di esprimere al massimo la potenzialità della tecnologia fotovoltaica,

predisponendo un ambiente normativo adeguato e agevolante. In contesto politico è stato necessario rincorrere questa esponenziale diffusione delle tecnologie fotovoltaiche emanando con urgenza decreti e direttive al fine di stabilizzare la realtà normativa. Dal 2012 il fotovoltaico è stato incluso nella direttiva RAEE dell'UE (2012/19/UE), classificandoli come rifiuti provenienti da apparecchiature elettriche ed elettroniche, al fine di assicurare il loro corretto smaltimento sulla base del concetto di "Responsabilità estesa al Produttore". Si rende quindi necessario da parte delle società che operano nel campo fotovoltaico creare una soluzione per facilitare il rispetto dei nuovi obblighi. La responsabilità del riciclo dei beni a fine vita passa dagli enti locali all'industria e i corrispondenti costi di gestione vengono internalizzati nei prezzi dei prodotti stessi. I Paesi si sono impegnati a recepire le direttive e ottenere le conformità richieste. In particolare l'Italia ha espresso tale volontà dando vita a una filiera per la corretta gestione del fine vita dei moduli fotovoltaici tramite un accordo siglato tra Cobat - Consorzio Nazionale Raccolta e Riciclo e Comitato IFI – Industrie Fotovoltaiche Italiane. In quest'ultimo confluiscono le principali aziende manifatturiere che costituiscono oltre l'80% della capacità produttiva di celle fotovoltaiche in Italia. Nel contesto europeo invece PV Cycle si sta proponendo di rappresentare l'intero processo operativo di raccolta e riciclaggio, incluso il relativo finanziamento.

Le problematiche legate allo smaltimento dei prodotti fotovoltaici sono tuttora discusse. Oltre all'enorme quantitativo previsto nei prossimi anni occorre affrontare la questione della non omogeneità dei rifiuti generati dagli impianti e dalle diverse tipologie di componenti in essi contenuti: oltre i pannelli con le relative intelaiature sono inclusi inverter, cavi e strutture elettroniche di connessione.

La questione dello smaltimento non deve essere unicamente percepita come un aspetto negativo e una problematica da risolvere, ma piuttosto come una opportunità da cui trarre beneficio. Dalla dismissione degli impianti fotovoltaici si possono infatti ricavare numerosi materiali da riutilizzare, ad esempio vetro, alluminio, indio, gallio. In particolare quest'ultimi elementi risultano a rischio esaurimento a causa della loro richiesta esponenziale. Dunque le frazioni di materiali derivanti da un processo di riciclo risultano molto interessanti e possono essere reinserite nei cicli produttivi senza

dover essere dispersi. Il riciclaggio non solo sostiene l'ambiente, ma porta anche vantaggi economici ai nuovi produttori che potranno ridurre i costi di produzione. Consente infatti di ridurre l'energia e le fasi di lavorazione necessarie alla creazione di nuovi prodotti.

In Italia oltre il 90% dei pannelli installati impiega la tecnologia a silicio cristallino. Le conoscenze acquisite in ambito elettrotermico hanno reso possibile lo sviluppo di processi innovativi in tale ambito che determineranno un impatto interessante sulla catena di produzione dei moduli fotovoltaici al silicio cristallino, come ad esempio la realizzazione di un forno a induzione per la solidificazione dei lingotti di silicio e la progettazione di un sistema a radio frequenza per la separazione dei materiali di cui è costituito il pannello fotovoltaico ai fini del riciclo. Queste e altre applicazioni permettono di fornire all'industria fotovoltaica opportunità di crescita interessanti e nuove possibilità di soluzioni migliorative. Sono inoltre presenti nuove promettenti generazioni di pannelli solari, ancora in fase di sviluppo, che mostrano l'intenzione di aumentare ulteriormente l'efficienza e ridurre il loro costo. Le aziende produttrici investono e continueranno a investire molto nella ricerca allo scopo di scoprire nuovi progetti di convenienza. Ad esempio un nuovo record di efficienza è stato raggiunto nell'ultimo anno dai ricercatori della University of New South di Wales in Australia, i quali si sono dimostrati capaci di realizzare un sistema in grado di convertire in elettricità il 40% dell'energia solare. Tale valore era già stato superato a livello di singole celle fotovoltaiche, ma mai a livello di sistema.

All'interno del nostro Paese ci si è anche interrogati sugli effetti, in particolare a livello economico, derivanti dall'impiego di energia pulita per la produzione elettrica. Al riguardo recentemente è stata condotta un'analisi da parte di Althesys per conto dell'associazione ambientalista Greenpeace, intitolata "Le ricadute economiche delle energie rinnovabili in Italia", dalla quale è risultato che il settore dell'energia pulita garantisce il lavoro a 60.000 addetti e per il 2030 ne sono previsti addirittura 100.000. Emerge inoltre che il valore aggiunto generato nel 2013 risulta pari a 6 miliardi di euro, di cui 2,5 miliardi sono imputabili alla generazione energetica, la quale si afferma come la filiera a maggiore valore aggiunto. Numerosi appaiono quindi i

segmenti valorizzabili dal mercato fotovoltaico, come la gestione e la manutenzione, la fabbricazione dei componenti, la progettazione e l'installazione, ecc.

Buoni presupposti per il futuro del settore vengono offerti inoltre dalla possibilità di abbinare agli impianti sistemi di accumulo, rispetto i quali il quadro normativo sta provvedendo adeguate misure e regole operative. Il dibattito sull'*Energy Storage*, sistema che permette di raccogliere l'energia prodotta dalle fonti rinnovabili in modo da renderla disponibile nell'istante in cui gli impianti non sono in funzione, è affrontato in vari Paesi come Germania e Stati Uniti, i quali lo ritengono fonte potenziale di valore e posti di lavoro.

Una nuova possibile configurazione è stata recentemente approvata da una normativa che consente a un operatore che installa un impianto fotovoltaico di vendere a un cliente l'energia prodotta. La ditta si impegna quindi a cedere al proprio cliente il kWh generato per un determinato periodo di tempo a un prezzo bloccato, mentre l'impianto rimane di proprietà del produttore. Tale assetto prende il nome di SEU - Sistemi Efficienti di Utenza e ha catturato l'attenzione del mondo delle energie rinnovabili grazie a una serie di vantaggi da esso garantiti. L'energia autoprodotta infatti permette di evitare il pagamento di oneri connessi alla trasmissione e la distribuzione sul sistema, rendendo le aziende molto più competitive, e garantisce dunque un risparmio al consumatore sull'acquisizione dell'energia elettrica rispetto a quella prelevata dalla rete pubblica. Il susseguirsi di tutti questi aspetti innovativi e la volontà espressa dalle aziende di ricercare sempre impianti di migliore convenienza dimostrano come il mercato del fotovoltaico sia caratterizzato da continue evoluzioni e capacità di reinventarsi ogni anno che passa, divenendo una piattaforma promettente per ulteriori investimenti futuri su diversi ambiti.

Chiunque decida di installare un impianto fotovoltaico attua una scelta consapevole per ottimizzare le risorse ambientali e, a supporto di questo dato comunemente accettato, risulta necessario estendere tale riflessione anche sulla destinazione dei moduli al termine del loro ciclo di vita in modo che diventi connaturato all'acquisto stesso. Scopo di questa tesi è quello di evidenziare la necessità di una gestione della fase "end of life" dell'impianto e in particolare dei suoi principali componenti, essendo

la maggior parte di questi completamente riutilizzabile. In quest'ottica il riciclaggio può costituire una valida soluzione, la quale viene supportata dalle continue innovazioni tecnologiche a cui si sta andando incontro e dallo sforzo comune dimostrato dalle aziende e dalle filiali del settore. Lo sviluppo del fotovoltaico dovrà essere accompagnato di pari passo dalla tutela del governo sotto forma di emendamenti e regole operative che ne favoriscano l'espansione e allo stesso tempo la dismissione degli impianti. In un futuro non molto lontano ci potremmo trovare dinanzi a un nuovo problema ambientale rappresentato dallo smaltimento dei rifiuti fotovoltaici e appare quindi di profonda importanza attrezzarsi fin da subito e prepararsi ad affrontare la sfida. Ciò dovrà spingere le istituzioni comunitarie e gli attori operanti sulla supply-chain del fotovoltaico a prestare dovuta attenzione alla necessità del riciclaggio in modo da evitare a questi impianti una fine ingloriosa, come ad esempio la discarica, la quale apparirebbe in netto contrasto allo scopo principale della produzione di energia pulita mediante fonti rinnovabili. Diventa quindi fondamentale chiudere in maniera virtuosa il ciclo di vita degli impianti in modo da rendere l'energia fotovoltaica "*Double Green*", ovvero doppiamente verde, come recita lo slogan dell'associazione PV Cycle.

Il 2015 si dimostrerà un anno ricco di cambiamenti e nuove decisioni in questo settore, e vedrà come protagonisti di analisi e discussioni il concetto di *Energy Storage* (stoccaggio di energia) e la configurazione SEU (Sistemi Efficienti di Utenza), due appetibili ambiti di investimento che purtroppo l'Italia attualmente si sta lasciando sfuggire. Infatti i sistemi di accumulo rappresentano una tecnologia abilitante per un ulteriore sfruttamento e sviluppo del fotovoltaico e, quindi, una nuova frontiera da esplorare.

In conclusione, tramite questo scritto si intende evidenziare come il fotovoltaico si dimostrerebbe capace di mantenere la promessa di costituire un importante contributo al raggiungimento degli obiettivi ambientali, energetici e anche economici europei negli anni a venire.

CAPITOLO I - IL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Caratteristiche, funzionamento, struttura interna

1. Nozioni generali

1.1 Descrizione impianti fotovoltaici

L'impianto fotovoltaico è sostanzialmente un sistema che sfrutta i raggi solari per ricavare corrente elettrica attraverso il principio di funzionamento detto "effetto fotovoltaico". Quest'ultimo si realizza grazie alla proprietà caratteristica di alcuni materiali semiconduttori che, opportunamente trattati, sono in grado di assorbire fotoni (particelle elementari della radiazione solare) rilasciando elettroni. Sulla base di questo procedimento nel momento in cui una radiazione elettromagnetica colpisce la superficie dei pannelli solari si innesca un movimento di elettroni che va a determinare un flusso di corrente elettrica. Il processo di conversione avviene senza la produzione di sostanze di scarto e con ridottissime emissioni di CO₂ in atmosfera. Attualmente sul mercato sono disponibili diverse tipologie di pannelli, ma tutte dipendono il loro funzionamento dal procedimento appena descritto.

Un sistema fotovoltaico presenta una struttura eterogenea, formata dalla presenza di diverse tipologie di componenti:

- Moduli o pannelli fotovoltaici;
- Inverter;
- Quadri elettrici e cavi di collegamento.

In generale l'impianto è essenzialmente creato dall'assemblaggio di più moduli fotovoltaici, i quali sfruttano l'incidenza dell'energia solare sulla loro superficie. Oltre ai moduli contiamo la presenza della necessaria componente elettrica (cavi) ed eventualmente di sistemi meccanici-automatici ad inseguimento solare. L'elemento

base nella costruzione dell'impianto è in ogni caso costituito dalla cella fotovoltaica. Più celle connesse insieme generano un modulo fotovoltaico, in grado di trasformare la luce solare direttamente in energia elettrica. Nel dettaglio il modulo è costituito da 36 celle fotovoltaiche, le quali vengono combinate sulla base delle reali esigenze energetiche dell'utenza o delle caratteristiche della superficie a cui sono destinate. La modularità dei pannelli consente quindi una vasta flessibilità d'impiego. Grazie al collegamento in serie le celle sono attraversate dalla radiazione solare e, attraverso dei contatti elettrici disposti alle estremità superiore e inferiore della cella, si genera un flusso di elettroni sotto forma di corrente elettrica continua. Per poter essere opportunamente sfruttata la corrente elettrica in uscita attraverso dispositivi *balance of system* all'interno dei quali viene adattata, per poi essere infine convertita in corrente alternata mediante l'inverter.

Nel momento in cui viene investita da una radiazione elettromagnetica la cella fotovoltaica si comporta quindi come un generatore di corrente. Un buon modello rappresentativo del funzionamento di una cella fotovoltaica è rappresentato dall'equazione del diodo ideale di Shockley, secondo il quale la corrente che scorre sul carico vale:

$$I = I_s - I_o \left(e^{qV_o/\eta kT} - 1 \right) - \frac{V_o}{R_p}$$

dove:

- I_s è l'intensità di corrente prodotta dal generatore;
- I_o è l'intensità di corrente di saturazione;
- V_o è la differenza di potenziale tra i terminali del diodo, ovvero quella a vuoto;
- q è la carica elementare dell'elettrone;
- η è il coefficiente di emissione (dipendente dal processo di fabbricazione) generalmente compreso tra 1 e 2;
- k è la costante di Boltzmann;
- T è la temperatura assoluta;
- R_p è la resistenza del modello.

Per i prodotti fotovoltaici in commercio si applica la pratica di classificarli in 12, 18 o 24 Volt. Questi valori non derivano dalla tensione al suo massimo grado di efficienza,

ma dalla possibilità di collegare una batteria ricaricabile con analoga tensione nominale. Il collegamento in serie delle celle solari è finalizzato all'ottenimento di una tensione più alta in uscita, ma non permette il controllo delle singole celle poiché la corrente è uguale per tutte. Di conseguenza un'eventuale cella in ombra risulta attraversata da una corrente più forte di quella che produrrebbe da sola e determina una strozzatura per l'intero sistema, disperdendo energia, scaldandosi e potenzialmente danneggiandosi. Ne deriva l'importanza che il pannello sia colpito da simile esposizione solare lungo l'intera superficie, senza individuare celle in zone d'ombra. Occorre osservare che tanto più risulta ampio l'impianto tanto più è probabile la differenza di esposizione e di corrente che la singola cella è in grado di generare.

Alla nostra vista le celle solari appaiono come piccole piastrelle nere o blu scure, con lunghezza laterale fino a 10cm, e il semiconduttore di cui sono caratterizzate è disposto in uno strato di tre decimi di mm. Per preservare tale materiale semiconduttore viene steso sopra di esso una sottile lastra di vetro.

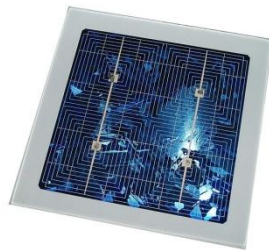


Immagine rappresentativa di una cella in silicio

Quasi sempre il semiconduttore impiegato è il silicio, il quale può presentarsi sotto forma cristallina o amorfa. Il mercato fotovoltaico è stato finora ampiamente dominato dall'utilizzo del silicio, con struttura mono o policristallina, destinato alla costruzione delle celle fotovoltaiche ma, ultimamente, si sta evidenziando un forte interesse da parte di varie aziende produttrici nel realizzare linee di produzione di moduli basati su silicio amorfo (pannelli a film sottile), il quale presenta un costo minore rispetto al cristallino. In questo contesto non si può più parlare di celle, in quanto la loro formazione avviene mediante deposizioni di silicio (appunto allo stato amorfo) su superfici che possono risultare anche molto ampie. All'interno di questo contesto, di recente, si è inoltre messa a punto una tecnologia produttiva capace di realizzare più strati di silicio amorfo, nominata "eterogiunzione", la quale sembra risolvere i problemi di stabilità

riscontrati in passato. Necessita comunque di riduzioni di costo affinché si possa diffondere su larga scala.

1.2 Parametri tecnici

Fra le caratteristiche tecniche descrittive di un impianto fotovoltaico individuiamo la potenza nominale (simbolo:W), ottenuta dalla somma dei singoli valori di potenza di ciascun modulo e l'unità di misura [Watt].

Si prende inoltre in considerazione la superficie che un impianto va a occupare, la quale risulta in genere di poco maggiore rispetto a quella corrispondente ai moduli fotovoltaici presi insieme. Ogni tipo di cella presenta un tipico ingombro superficiale che viene a dipendere da diversi fattori. La tecnologia di silicio mono e policristallino richiede $8 \text{ m}^2/\text{kW}$ nel caso in cui i moduli siano esposti verso Sud e montati in modo complanare alla superficie. Se invece non sono installati in maniera adiacente al piano si deve tener conto dell'ombra che gli stessi pannelli producono, e quindi si rendono necessari $20 \text{ m}^2/\text{kW}$ di superficie. A questi valori occorre eventualmente aggiungere le aree occupate da possibili coni d'ombra prodotti da ostacoli, quali camini, antenne, ecc. Con le tecnologie a silicio amorfo l'ingombro superficiale misura valori oltre i $20 \text{ m}^2/\text{kW}$. Negli impianti disposti su terreno o tetto piano è prassi comune distribuire geometricamente i moduli su più file, adeguandoli alle esigenze geometriche del sito d'installazione, e sollevarli singolarmente in maniera opportuna verso il sole al fine di massimizzare l'irraggiamento captato. L'energia prodotta, infatti, risulta tanto maggiore quanto più l'impianto gode di un'esposizione favorevole ai raggi. A questo scopo si stanno realizzando moduli fotovoltaici a inseguimento solare, i quali adattano l'inclinazione del pannello ricevente durante il giorno e le stagioni. In queste configurazioni l'unico componente disposto in esterni è il campo fotovoltaico, mentre i moduli del regolatore e dell'inverter sono tipicamente inseriti in locali tecnici predisposti.

Il rendimento garantito da una cella fotovoltaica è dato dal rapporto tra l'energia elettrica prodotta e l'energia della radiazione solare incidente sulla sua superficie. Poiché la funzionalità di una cella fotovoltaica varia in maniera dipendente alla sua

temperatura e alla radiazione, per poter operare dei confronti e delle analisi comparative sono state definite delle condizioni standard alle quali fa riferimento il cosiddetto watt di picco (Wp). Il suo valore è relativo alla potenza fornita dalla cella alla temperatura di 25 °C sotto una radiazione di 1000 W/mq e in condizioni di AM (massa d'aria) 1,5.

Parametro fondamentale di prestazione della cella fotovoltaica è fornito della sua *efficienza di conversione*, calcolata come il rapporto tra l'energia captata e trasformata rispetto a quella totale incidente fornita dall'irraggiamento solare. Il suo valore viene espresso in percentuale ed è impiegato come indicatore di qualità. Come in tutti i sistemi di conversione energetica, l'efficienza del modulo è inferiore all'unità per effetto di inevitabili perdite del sistema. La misura risulta infatti limitata da diversi fattori, quali riflessioni dei raggi incidenti, dispersione degli elettroni eccitati dai fotoni (i quali non riescono a produrre corrente elettrica) e infine le resistenze associate, ad esempio, ai contatti elettrici.

Il calcolo dell'efficienza ha effetti sulle dimensioni fisiche dell'impianto: tanto maggiore è il suo valore tanto minore risulta la superficie necessaria del pannello per raggiungere un determinato livello di potenza. Il miglioramento del parametro di efficienza può essere ottenuto attraverso un processo sempre più spinto di purificazione del materiale semiconduttore impiegato (in modo che la radiazione captata e convertita risulti maggiore) oppure mediante l'uso combinato di più materiali semiconduttori che coprano la maggior parte possibile di spettro della radiazione solare incidente. Tanto migliore è l'efficienza tanto maggiori tendono a essere i costi, in quanto il processo di fabbricazione risulta più spinto e raffinato. A livello impiantistico il valore di efficienza dipende anche dalla temperatura. Facendo riferimento a una temperatura della cella di 25 °C per le celle in silicio cristallino si registra una perdita del rendimento di 0,45% per ogni grado centigrado di aumento del valore di temperatura. A causa del naturale affaticamento dei materiali le prestazioni di un pannello diminuiscono di circa un punto percentuale su base annua. In generale nelle celle cristalline il valore di efficienza si mantiene pressoché costante nel tempo, tanto che i costruttori garantiscono perdite inferiori al 20% dopo 25 anni. Per quanto riguarda le celle di silicio amorfo si determina una perdita stimabile attorno al 30% per

i primi due anni, quindi assume un assestamento con andamento quasi costante nel tempo. Al fine di garantire la qualità dei materiali esiste una normativa che obbliga una garanzia minima di due anni sui difetti di fabbricazione e sul calo di rendimento del silicio nel tempo. A inizio 2012 si è registrato un nuovo record di efficienza dei moduli pari a 33,9% ottenuto con innovativi pannelli fotovoltaici a concentrazione dotati della funzionalità “inseguimento solare”. Valori tipici riscontrabili invece nei comuni prodotti commerciali a base silicea si attestano attorno a:

- 21% nei moduli in silicio monocristallino;
- 16,7% nei moduli in silicio policristallino;
- 8,5% nei moduli in silicio amorfo.

Sulla base della valutazione di questi dati si ricava che, a parità di produzione elettrica richiesta, la superficie occupata da un pannello fotovoltaico amorfo sarà più che doppia rispetto a un equivalente campo fotovoltaico cristallino.

1.3 Classificazioni e tipologie d'impianti

Gli impianti fotovoltaici sono tipicamente suddivisi in tre grandi famiglie:

- Impianti “indipendenti” (detti anche *stand-alone*);
- Impianti “*grid-connect*”;
- Impianti “ibridi”.

I primi non sono collegati ad alcuna rete di distribuzione e, di conseguenza, sfruttano direttamente sul posto l'energia elettrica prodotta, avvalendosi di accumulatori di energia. Nella maggior parte dei casi si ricorre a una configurazione autosufficiente di questo tipo allo scopo di assicurare la richiesta elettrica di utenze geograficamente isolate da altre fonti energetiche e non raggiungibili dalla rete nazionale. Rientrano in questa tipologia anche alcune applicazioni quali la segnaletica stradale o l'illuminazione nei giardini domestici. Gli impianti connessi alla rete invece immettono la propria produzione elettrica risultante, opportunamente convertita e sincronizzata, sulla rete contribuendo alla generazione distribuita. Quindi non impiegano l'energia ottenuta dall'impianto, ma lavorano parallelamente al sistema di

distribuzione. Infine i cosiddetti impianti ibridi rimangono connessi alla rete di distribuzione, ma impiegano principalmente l'energia solare per la loro produzione energetica grazie al supporto di un accumulatore. Qualora quest'ultimo si ritrovasse scarico (causa, ad esempio, di un lungo utilizzo durante le ore notturne) una centralina di controllo predispone l'acquisizione di energia collegando l'utenza alla rete elettrica.

Oltre a quelle appena descritte, esistono altre tipologie di impianti fotovoltaici. Vengono qui di seguito proposti alcuni esempi.

- Impianti orientabili: sistemi in grado di seguire l'andamento giornaliero del sole, garantendo in questo modo ai moduli di sottoporsi alle migliori condizioni di irraggiamento. Sono in grado di muoversi lungo uno o addirittura più assi. A fronte di un'esposizione solare ottimale si incorre però in un costo iniziale e di manutenzione molto elevato.
- Impianti a concentrazione: categoria che rientra in una nuova concezione di sistemi fotovoltaici. Essi cercano di aumentare il rendimento delle celle attraverso lenti e sistemi di specchi molto costosi che moltiplicano il numero di raggi solari incidenti sui pannelli. Permettono di ridurre l'area esposta al sole, ma soffrono ancora di alcune problematiche a esse connesse, quale ad esempio la necessità di sistema di raffreddamento atto a garantire la loro integrità nel tempo.
- Sistemi per l'alimentazione diretta: caso in cui il pannello alimenta direttamente il dispositivo a esso associato, ma non prevede la possibilità di immagazzinare energia (come le calcolatrici solari).

Una menzione a parte può essere fatta per il cosiddetto BIPV (*Building Integrated PhotoVoltaics*), ovvero Sistemi fotovoltaici architettonicamente integrati. Essi rientrano in una tipologia di impianto solare caratterizzato da elementi innovativi e realizzato con speciali componenti o moduli non convenzionali. L'integrazione architettonica viene ottenuta posizionando il pannello dell'impianto all'interno del profilo stesso dell'edificio che lo accoglie. A tale scopo si può ricorrere a tre tecniche principali:

- Sostituzione locale del manto di copertura (ad esempio tegole) con un rivestimento idoneo a cui si sovrappone il campo fotovoltaico;

- Impiego di tecnologie idonee, come i film sottili;
- Uso di moduli strutturali che svolgono anche la funzione di infisso.

I moduli con cui sono formati i pannelli devono quindi garantire l'integrazione in coperture di edifici, superfici opache o trasparente verticali e/o piani apribili, come porte e finestre. Sono realizzati per la produzione di energia elettrica, ma allo stesso tempo assolvono la funzione di protezione dell'edificio, impermeabilizzazione della struttura edilizie e supporto per la tenuta meccanica dell'elemento strutturale.

I costi da sostenere per adottare questa tipologia di soluzione risultano maggiori rispetto all'impianto tradizionale, ma il risultato estetico è talmente apprezzabile che vengono citati in una normativa ("IV e V Conto Energia"), all'interno della quale vengono tutelati e valorizzati riconoscendo una tariffa incentivante su impianti con potenza compresa tra 1kW e 5 MW.

Diverse possono essere le variabili alle quali fare riferimento per operare una classifica degli impianti fotovoltaici. Questi infatti possono essere suddivisi anche in base alla loro dimensione, con particolare riguardo ai sistemi connessi alla rete, in:

- Piccoli impianti, con potenza nominale inferiore a 20kW;
- Medi impianti, caratterizzati da una potenza compresa tra 20 e 50kW;
- Grandi impianti, con potenza nominale maggiore di 50kW.

Un altro parametro di distinzione è rappresentato dal valore di potenza, il quale individua:

- Impianti fotovoltaici con potenza non superiore a 200 kWp, particolarmente indicati per l'installazione su immobili di cittadini privati, di attività commerciali e piccole aziende. Negli impianti residenziali infatti la potenza non supera quasi mai i 6 kWp. L'energia generata è solitamente destinata a ridurre i prelievi della rete e i conseguenti costi sostenuti per la fornitura elettrica. Il sistema richiede limitata necessità di manutenzione e bassi oneri di gestione;
- Impianti fotovoltaici con potenza superiore a 200 kWp, realizzati principalmente a imprese interessate sia all'autoconsumo che alla pura vendita. I costi di esercizio in questa categoria aumentano e possono sussistere casi in cui il sistema richieda l'installazione di una linea elettrica idonea al trasporto dell'energia prodotta.

2. Tipologie di pannelli solari

2.1 Tecnologie fotovoltaiche

Il materiale base delle celle solari è costituito da un semiconduttore, un particolare materiale i cui elettroni possono facilmente diventare liberi nel momento in cui assorbono luce (fotoni) secondo quello che viene definito “effetto fotoelettrico”. La luce solare incidente possiede energia sufficiente a liberare gli elettroni più esterni degli atomi del materiale, i quali si allontanano dall’atomo di origine creando lacune. Requisito basilare di un materiale fotovoltaico è quindi dato dalla capacità di generazione di queste coppie elettrone-lacuna dovute alla radiazione elettromagnetica che, investendo il materiale, cede energia. Fra i molti materiali impiegabili per la costruzione dei pannelli fotovoltaici il silicio risulta in assoluto quello più utilizzato. Esso viene ottenuto in sottili placche, dette “*wafers*”, i quali in seguito sono unite fra loro in modo da formare il modulo.

È dunque possibile ottenere una distinzione dei pannelli fotovoltaici sulla base della loro modalità di produzione. Attualmente le principali tecnologie impiegate sono:

- Tecnologia al silicio mono e policristallino;
- Tecnologia al silicio amorfo;
- Tecnologia “CIS”.

Ciascuna di queste tipologie è contraddistinta da caratteristiche differenti a seconda del tipo di cella impiegata e il materiale semiconduttore utilizzato. Ad oggi nel mercato fotovoltaico si trovano prevalentemente due categorie di pannelli, classificabili sulla base della struttura del materiale semiconduttore che lo compone (quasi sempre silicio) in moduli cristallini e moduli a film sottile. I moduli che impiegano il silicio in qualità di semiconduttore in forma mono o policristallina si dicono appartenenti alla prima generazione di pannelli fotovoltaici, mentre quelli a film sottile rientrano nella seconda generazione. Ultimamente sono in fase di sviluppo nuove linee di produzione dedicate a gamme di prodotti solari innovativi appartenenti a una nuova generazione di pannelli fotovoltaici, i quali sfruttano materiali e tecniche di costruzione alternative al fine di raggiungere nuovi traguardi nei valori di rendimento offerti. Molte aziende produttrici

infatti continuano a dedicare tempo e risorse alla ricerca continua di nuove strade per la costruzione di pannelli fotovoltaici sempre più economici ed efficienti.

In una panoramica generale si possono quindi trovare in commercio le seguenti tecnologie di pannelli fotovoltaici:

- **Silicio monocristallino (sc-Si)**

Per la produzione di celle monocristalline si impiegano semiconduttori dotati di una struttura altamente pura. A partire da una massa di silicio fusa si ricavano delle barre che in seguito vengono tagliate in wafer. All'interno di queste fette l'allineamento perfetto degli atomi di silicio allo stato puro garantiscono la massima conducibilità. Le celle caratterizzate da questo tipo di struttura garantiscono dunque il rendimento maggiore, essendo quest'ultimo proporzionale alla purezza del materiale, ma di conseguenza anche il loro costo risulterà molto elevato. Inoltre, dato che i wafer vengono ottenuti da lingotti cilindrici si dimostra difficile ricoprire con essi superfici estese senza sprecare materiale o spazio.

- **Silicio policristallino (mc-Si)**

La realizzazione di questa tecnologia risulta molto onerosa. In questo caso la massa di silicio viene fusa in blocchi da cui vengono ricavati dei dischetti. Durante il processo di solidificazione la struttura non omogenea, costituita da cristalli di silicio di dimensioni differenti, determinano una minore purezza del materiale. Il vantaggio di questa realizzazione risiede nella facilità con cui è possibile tagliare il silicio in forme adatte ad essere poi combinate in moduli. Presentando però sulla superficie alcuni difetti, il rendimento di questa tipologia di celle è leggermente inferiore e, di conseguenza, risultano più economiche.

- **Silicio amorfo (a-Si)**

In questo caso il pannello viene ottenuto in maniera monolitica senza ricorrere all'assemblaggio di più celle fotovoltaiche. Il silicio infatti non risulta organizzato secondo alcuna struttura cristallina o disposizione spaziale ordinata, e la quantità necessaria alla produzione risulta notevolmente inferiore rispetto a quella delle celle standard, riducendo di molto i costi di realizzazione. La difettosità del materiale è conseguente alla semplicità della sua produzione, ottenuta attraverso la deposizione di un sottile strato semiconduttore (film sottile) su un supporto di tipo vetroso, per i

pannelli rigidi, oppure plastico, nel caso di pannelli flessibili e non convenzionali. Quest'ultima configurazione permette di plasmare il modulo a proprio piacimento adattandolo alla superficie disponibile, dimostrandosi adatto a ricoprire piani non regolari nella forma. Rispetto alle tecnologie precedenti è caratterizzato dal costo più favorevole, inferiore del 30-40%. Tuttavia questa tecnologia consegue rendimenti meno costanti rispetto ai valori nominali e molto bassi.

- **Diseleniuro di rame e indio (CIS) e Diseleniuro di rame, indio e gallio (CIGS)**

Queste nuove tecnologie impiegano al posto del materiale semiconduttore una miscela di Rame, Indio e Selenide (CuInSe_2). Entrambi le configurazioni garantiscono efficienze superiori al silicio amorfo, ma risultano ancora poco diffusi a causa del loro costo elevato. Questa condizione è confermata dal fatto che pochissime aziende a livello mondiale hanno inserito tale tecnologia all'interno delle loro linee di produzione. La sua realizzazione risulta inoltre svantaggiata dalla limitata disponibilità di indio e dalle tracce di cadmio e altri materiali tossici di produzione.

- **Telleruro di cadmio (CdTe)**

La tecnologia presenta un nuovo semiconduttore contraddistinto da rese superiori rispetto a quelli attualmente diffusi. È caratterizzato da un basso costo di produzione e i suoi svantaggi risultano i medesimi della tecnologia precedente. Costituiscono quindi i pannelli più economici a disposizione e caratterizzati dal più basso rendimento termodinamico. Su questa tipologia produttiva si è ampiamente discusso riguardo il suo eventuale divieto di produzione, dettato dalla documentata tossicità del cadmio (entrato nella lista dei materiali vietati nelle produzioni elettriche ed elettroniche).

- **Arseniuro di gallio (GaAs)**

Questa categoria tecnologica si fonda su una lega binaria, dotata di proprietà semiconduttive in grado di assicurare rendimenti elevatissimi. È principalmente impiegata per applicazioni militari o scientifiche avanzate, tuttavia il costo proibitivo del materiale silicico monocristallino lo sta indirizzando a un impiego di nicchia.

- **Celle multigiunzione**

Negli ultimi anni le aziende produttrici si sono dimostrate interessate alla realizzazione di celle costituite da più strati di materiale semiconduttore sovrapposti con gap diversi di energia, in modo tale che ciascuno possa assorbire in modo ottimale i fotoni di un

certo range di energia. In questo modo si riesce a ottenere un miglioramento dell'efficienza complessiva della cella fotovoltaica.

Proponiamo ora una tabella riassuntiva dei valori di parametri che contraddistinguono ciascuna tipologia di cella.

Tecnologia fotovoltaica	Efficienza modulo [%]	Potenza per m² di moduli PV [Wp]	Spazio necessario per 1kWp [m²]
sc-Si	14-21	140-210	5-7
mc-Si	12-18	120-180	6-8
a-Si	4-10	40-100	10-25
CIS, CIGS	9-13	90-130	8-11
CdTe	12-14	120-140	7-8
Celle multigiunzione	7-9	70-90	11-14

2.2 Nuove generazioni di pannelli fotovoltaici

Sta affiorando ora sul mercato una nuova gamma di celle solari di tipo organico, appartenenti alla terza generazione di produzione fotovoltaica, la quale comprende quei dispositivi la cui parte foto-attiva è basata su composti organici di carbonio. Questa tipologia di sistema prende ispirazione dal processo di fotosintesi clorofilliana delle piante, impiegando una miscela di materiali in cui un pigmento assorbe la radiazione solare e gli altri componenti estraggono la carica per produrre elettricità. Tali **celle fotoelettrochimiche** permettono un uso più flessibile dei materiali e la loro tecnologia di produzione appare molto conveniente. Tuttavia i coloranti utilizzati soffrono di problemi di degrado se esposti al calore o alla luce ultravioletta. Attualmente queste celle si trovano in diversi stadi di ricerca e maturazione tecnologica e si stima per loro un impatto commerciale entro una decina di anni.

In questo contesto sta emergendo come una delle più promettenti alternative ai moduli in silicio la cosiddetta cella Gratzel, anche se finora si è dimostrata in grado di produrre poca energia utile. Infatti al suo interno si determina un flusso unidirezionale di elettroni che provoca un cortocircuito interno. Il principio di funzionamento si basa sulle deposizione di uno strato di molecole organiche, trattate in modo da renderle in grado di assorbire la luce solare, sulla superficie di un semiconduttore. La cella è in

sostanza formata da un elettrodo di vetro conduttore su cui è disposto uno strato semiconduttore, spesso costituito da TiO_2 , impregnato di un colorante fotosensibile. Quando quest'ultimo viene colpito dalla luce, esso si eccita cedendo un elettrone allo strato semiconduttore che, a sua volta, lo trasferisce al vetro. Questo infine va ad alimentare un circuito elettrico, producendo lavoro utile. I vantaggi di questo tipo di cella risiedono nei costi molto contenuti di produzione e la facilità di reperimento dei suoi componenti.

Si è operato un confronto di produttività tra le celle contenute silicio e quelle appena descritte. Esaminando i risultati è stato possibile osservare come il pannello solare al silicio funziona bene alla presenza di una luce solare intensa, mentre riscontra alcune problematiche in penombra e non si presta affatto alla luce di una lampadina. Dall'altra parte le celle Gratzel funzionano non solo con la luce blu, ma anche con la luce più rossa di una lampadina (secondo lo spettro di assorbimento del colorante), anche se la quantità di corrente prodotta risulta molto bassa. Inoltre esse richiedono che il colorante sia sostituito a intervalli periodici molto ristretti.

Si può concludere che sarà possibile realizzare commercialmente questa tipologia di cella solo nel momento in cui si otterranno valori più alti di corrente e, a quel punto, si supererà in breve la convenienza delle attuali celle in silicio. Un significativo miglioramento potrebbe essere raggiunto quando si riuscirà a convogliare su un circuito esterno quasi tutti gli elettroni prodotti dalla luce. Probabilmente l'obiettivo sarà realizzabile in un futuro non troppo lontano grazie al contributo offerto delle nanotecnologie, che ne permetterà di incrementare la resa.

Un'altra recente tipologia di dispositivi fotovoltaici innovativi sono rappresentati dagli LSCs (Luminescent Solar Concentrators), ovvero **concentratori solari luminescenti**, formati da lastre di materiale trasparente plastico o vetroso all'interno del quale sono dispersi coloranti fluorescenti che assorbono una parte della luce solare. Sfruttando il fenomeno della riflessione totale interna, la radiazione è condotta verso i sottili bordi della lastra dove viene concentrata su celle solari di piccola superficie, trasformandosi in energia elettrica.

Queste ultime due categorie di celle risultano ancora in fase di sviluppo tecnologico e non sono quindi commercializzate su larga scala, tuttavia stanno già dimostrando la loro validità come nuova promettente generazione di pannelli fotovoltaici, capaci di aumentare sensibilmente l'efficienza del fotovoltaico.

Ad oggi sul mercato europeo la maggior parte dei pannelli fotovoltaici installati (80%) appartiene alla tecnologia di prima generazione, che prevede l'impiego del silicio come semiconduttore, caratterizzata da un peso specifico di 100 t/MW. La quota rimanente è rappresentata essenzialmente dai moduli a film sottile, in particolare i moduli in silicio amorfo, con peso specifico pari a 250 t/MW, e quelli al tellurio di cadmio, caratterizzati dal valore di 150 t/MW. Una porzione pressoché trascurabile di mercato è infine occupata dai moduli di terza generazione, a cui appartengono le ultime tecnologie in fase di ricerca e sviluppo.

3. Funzionamento, processi di drogaggio e architettura dei moduli

3.1 Effetto fotoelettrico

Il principio di funzionamento di una cella fotovoltaica è descritto tramite quello che viene definito “effetto fotoelettrico”: gli elettroni legati di un semiconduttore possono facilmente divenire liberi nel momento in cui assorbono energia solare, lasciando indietro nel legame spezzato un buco, chiamato lacuna. In questo modo avvengono tanti piccoli spostamenti di elettroni diversi, ciascuno dei quali lascia il legame in una coppia di atomi per crearne uno analogo all'interno di una coppia vicina. La conduzione elettrica nei semiconduttori non dipende quindi solamente dalla presenza di elettroni “vaganti”, ma anche dalla loro assenza nei legami.

All'interno della cella si rende necessaria la presenza di una differenza di potenziale che permetta di separare le cariche e fornire una corrente elettrica a un circuito esterno. A tale scopo occorre applicare un processo, definito drogaggio del semiconduttore, secondo il quale si immettono nel materiale quantità infinitesimali di elementi caratterizzati da una diversa struttura atomica. Gli atomi di tali elementi, chiamati impurità, prendono il posto di altrettanti atomi nel reticolo cristallino. Al termine dell'operazione il semiconduttore si dice drogato.

3.2 Drogaggio dei semiconduttori

Per incrementare la conducibilità del semiconduttore si accresce il numero delle cariche mobili (elettroni o lacune) immettendo nel materiale quantità infinitesime di elementi "impuri" in modo da creare un campo elettrico interno alla cella. Per realizzare il campo si stabilisce un eccesso di atomi caricati negativamente. Prendendo come riferimento un pannello fotovoltaico a base silicea, l'operazione di drogaggio viene ottenuta inserendo una piccolissima quantità di atomi di Boro (B) nel silicio, creando il cosiddetto materiale di "tipo p", e una piccola quantità di Fosforo (P), ottenendo materiale di "tipo n"¹. Gli atomi di boro che si insediano nel reticolo cristallino permettono di arricchire il semiconduttore di lacune (che equivalgono a cariche positive) dato che, sostituendosi a un atomo di silicio, non riescono a completare uno dei legami. Dall'altra parte il fosforo, prendendo il posto del silicio, crea legami covalenti con gli atomi vicini che però non vanno a coinvolgere uno dei suoi elettroni, determinando in questo modo un incremento del numero di cariche negative. Sulla base di questi comportamenti il boro viene anche chiamato "drogante accettore", mentre il fosforo "drogante donatore". Quando i due tipi di materiali vengono affiancati si crea una differenza di potenziale che determina un flusso di

¹ Dal punto di vista strettamente chimico un atomo di silicio possiede nella sua orbita esterna quattro elettroni e, di conseguenza, realizza legami covalenti con i quattro atomi più vicini. Durante l'operazione di drogaggio al posto del boro può essere impiegato qualsiasi altro elemento trivalente, come indio e gallio. Essi infatti occupano il quinto gruppo della tavola periodica degli elementi chimici e presentano tre elettroni nell'orbitale più esterna. Seguendo lo stesso ragionamento anche il fosforo può essere sostituito da un equivalente elemento pentavalente, come ad esempio l'arsenico, poiché possiedono entrambi cinque elettroni nell'orbitale esterna. Tutti questi elementi sono caratterizzati da differente struttura atomica e un numero di elettroni esterni diverso, e per questo motivo combinandosi fra loro vanno a determinare un eccesso di cariche positive o negative.

elettroni dalla zona n alla zona p e di lacune in direzione opposta fino al raggiungimento di un equilibrio elettrostatico. Tale equilibrio risulta caratterizzato da un eccesso di carica positiva nella zona n e un eccesso di carica negativa nella zona p. Il risultato ottenuto è quindi un campo elettrico in grado di separare i portatori di carica e generare un flusso di corrente nel momento in cui alla cella viene applicato un carico elettromagnetico.

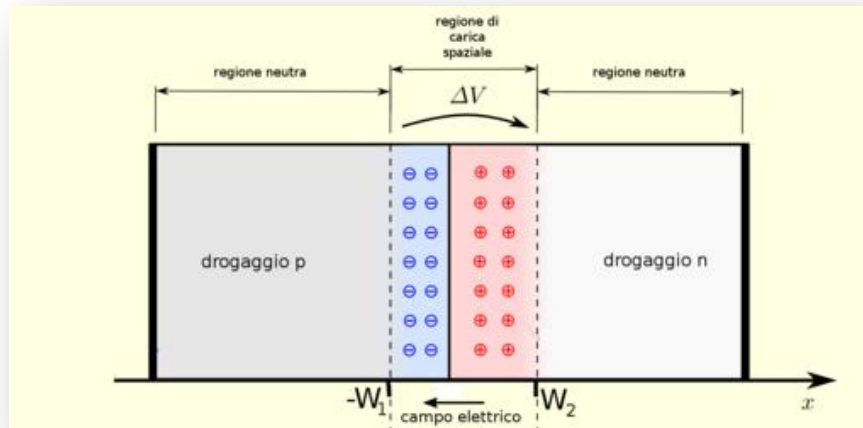


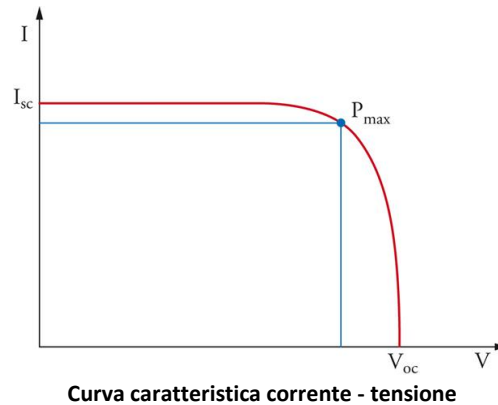
Immagine esplicativa del funzionamento interno di una cella

Se quindi all'interno di un cristallo di silicio si introducono droganti accettori da un lato e donatori dall'altro si realizza una giunzione p-n. All'interno delle due zone la concentrazione di cariche libere risulta diversa ed è per questo motivo che alcune lacune attraversano la giunzione per ricombinarsi con gli elettroni e allo stesso modo gli elettroni scorrono verso le lacune. A cavallo della giunzione si crea un'area povera di cariche libere, chiamata zona di svuotamento, nella quale sono presenti solo cariche fisse. È la presenza di queste cariche non neutralizzate che crea un campo elettrico e conseguentemente una differenza di potenziale, definita potenziale di contatto. Una volta attraversata questa zona di svuotamento gli elettroni non sono più in grado di invertire il loro flusso e tornare indietro. È la presenza di un conduttore elettrico esterno che consente agli elettroni di fluire verso il lato p, ricombinandosi con le lacune e chiudendo il circuito.

Occorre sottolineare che il materiale risulta globalmente neutro, dato che il processo di drogaggio viene realizzato con atomi neutri, e non ioni. Ciò che cambia quindi è l'eccesso e il difetto di elettroni nei legami.

3.3 Dipendenza dei parametri di una cella fotovoltaica

Si è già ricordato come una cella fotovoltaica, esposta alla radiazione solare, si comporta da generatore di corrente. Il suo funzionamento può essere descritto per mezzo dell'andamento della curva tensione-corrente.



Tale curva è in funzione di tre variabili fondamentali:

- L'intensità della radiazione solare, il cui variare incide sensibilmente sulla corrente di cortocircuito essendo l'irraggiamento direttamente proporzionale al numero di cariche generate. Non si viene a determinare invece alcun effetto significativo sulla tensione a vuoto;
- La temperatura, all'aumentare della quale si vengono a spezzare dei legami (a causa dell'agitazione termica) e si generano quindi coppie elettrone-lacuna che incrementano i valori di corrente. Con la tensione a vuoto il valore di temperatura instaura invece una proporzionalità inversa;
- L'area della cella, rispetto alla quale la corrente disponibile instaura una proporzionalità diretta.

3.4 Metodi di drogaggio dei wafer di silicio

3.4.1 Diffusione

Una prima modalità per realizzare il drogaggio del silicio è fornita dalla diffusione allo stato solido. Questo metodo si basa sull'evidenza che all'interno della struttura cristallina sussiste un'eventualità di incontrare alcuni difetti, detti vacanze, dovuti

all'assenza degli atomi di silicio. Tali spazi possono venire occupati da atomi di impurità droganti secondo la modalità illustrata nei paragrafi precedenti. Questo processo può essere reso possibile ponendo il wafer di silicio in un forno a diffusione, all'interno del quale risulta presente anche il materiale drogante allo stato gassoso. Gli atomi di impurità vengono quindi a depositarsi sul wafer e a diffondersi al suo interno. La capacità di diffusione dipende dalla temperatura alla quale avviene il processo, che raggiunge circa i 1000°C. L'operazione appena descritta prende anche il nome di *diffusione a sorgente limitata*.

Più lunga è la durata del procedimento più omogenea risulta la distribuzione delle impurità nella barretta. Spesso il wafer viene successivamente riscaldato fino a 1200°C in assenza del materiale drogante in modo che gli atomi di impurità si ridistribuiscono per agitazione cinetica.

3.4.2 Crescita epitassiale

Un secondo procedimento, denominato crescita epitassiale, consiste nel far depositare strati di atomi di silicio misti a impurità droganti sulla superficie di un wafer monocristallino di silicio, il quale funge da seme. Due sono i processi che possiamo seguire:

- *Epitassia da fase di vapore*, o CVD (Chemical Vapor Deposition), la quale avviene in una camera di reazione riscaldata tramite bobine a radiofrequenza. I wafer di silicio vengono esposti a gas inerti, i quali trascinano sostanze in fase gassosa contenenti silicio, come il tetracloruro di silicio (SiCl_4) o il silano (SiH_4). Alla temperatura del processo, compresa tra 100 e 1200°C, le molecole di queste sostanze si scompongono e i relativi atomi di silicio si depositano sul substrato. Nel caso si desiderasse aggiungere impurità droganti all'interno della camera si possono introdurre anche gas come la fosfina (PH_3), in modo da introdurre fosforo e ottenere quindi drogaggi di tipo n, oppure diborano (B_2H_6) per fornire boro e realizzare così un drogaggio di tipo p.
- *Epitassia a fascio molecolare*, o MBE (Molecular Beam Epitaxy), il cui procedimento risulta molto simile al precedente. La differenza in questa tecnica consiste nel fatto che il materiale gassoso drogante viene ottenuto bombardando con un fascio di ioni barrette di silicio e materiali droganti. Seguendo questa

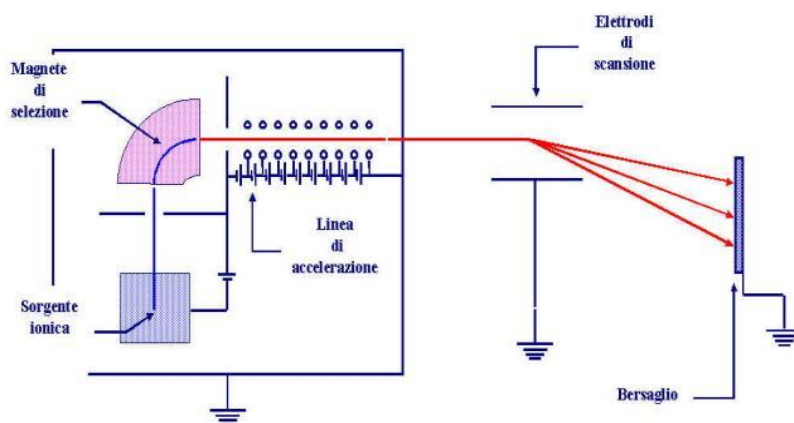
modalità d'azione si ha il vantaggio di poter procedere a temperature più basse (dai 400 agli 800°C) e inoltre di poter controllare l'accrescimento dello strato epitassiale e il suo drogaggio.

La tecnica della crescita epitassiale risulta migliore rispetto a quella per diffusione in quanto consente di ottenere profili di concentrazione più omogenei lungo le barrette di silicio. Lo svantaggio però risiede negli spessori di wafer ottenibili, i quali non possono essere molto elevati per poter garantire strati epitassiali monocristallini.

3.4.3 Impiantazione ionica

Per dispositivi di spessore particolarmente limitato diventa difficile eseguire con precisione l'operazione di drogaggio. Questa evidenza tecnologica ha condotto alla diffusione di nuove tecniche, come l'impiantazione ionica. Secondo la sua modalità di procedimento le sostanze droganti sono trasformate in ioni (dotati di una carica elettrica), i quali possono essere accelerati da campi magnetici. Il processo avviene mediante l'utilizzo dell'impiantatore, ovvero una macchina in grado di fornire agli ioni un'energia che può essere compresa nell'intervallo tra alcune centinaia di KeV [elettronvolt] fino a qualche MeV. Questi valori permettono di modificare le proprietà dei substrati sottoposti al processo per profondità pari ad alcuni micron al di sotto della superficie di interazione.

Una parte essenziale della macchina è formata dalla camera di collisione, all'interno della quale vengono ionizzati materiali, che possono presentarsi sotto forma solida o gassosa. Tale processo avviene mediante evaporazione o sublimazione del materiale introdotto e il suo successivo bombardamento con elettroni appositamente accelerati.



Schema illustrativo delle componenti presenti in una macchina per l'impiantazione ionica

Tramite elettrodi di accelerazione si stabilisce l'energia ceduta al fascio ionico e la sua focalizzazione sul bersaglio. In generale gli ioni che vengono estratti dalla sorgente possono contenere elementi diversi da quelli desiderati nel processo e, per questa ragione, si rende necessario un'analisi del fascio ionico al fine di selezionare le specie di interesse dalle altre. A tale scopo si utilizza un magnete il quale, deviando ciascuna ione secondo una formula che implica la massa, consente di ottenere la selezione desiderata tra ioni diversi per massa o carica.

3.5 Formazione delle giunzioni p-n

3.5.1 Sovracompensazione

La realizzazione della giunzione si basa sul seguente ragionamento: se si ha a disposizione un wafer drogato con determinati atomi di impurità, ad esempio di tipo p, effettuando un nuovo drogaggio di tipo opposto, con quantitativi tali da ottenere una concentrazione di droganti n superiore, si ottiene una sovracompensazione di elettroni rispetto alle lacune, invertendo così il drogaggio di quel wafer.

Supponendo di voler realizzare un transistor npn, in una prima fase viene effettuato il drogaggio di tipo n dell'intera barretta in modo che la concentrazione di impurità sia praticamente costante su tutta la lunghezza. Si applica quindi una seconda diffusione di tipo p secondo un profilo non omogeneo, ottenendo una giunzione nel punto in cui le due concentrazioni si equilibrano. Infine si effettua una terza diffusione con un profilo di concentrazione ancora più ripido. In corrispondenza della zona in cui quest'ultima concentrazione supera quella formata da atomi droganti p il wafer diviene nuovamente di tipo n. Nel punto in cui la somma delle concentrazioni di atomi donatori supera quella degli accettori si forma la seconda giunzione.

3.5.2 Diffusione in oro

Spesso il processo di diffusione viene utilizzato allo scopo di diffondere atomi di oro nei wafer di silicio. La funzione assunta da tale elemento non è quella di aumentare lacune o elettroni. I suoi atomi possiedono la proprietà di aumentare la velocità del

processo di ricombinazione e, di conseguenza, la loro presenza permette di rendere il procedimento di svuotamento delle giunzioni più rapido e le commutazioni più veloci.

3.5.3 Tecnologia planare

Nella realizzazione di dispositivi elettronici le zone con i diversi drogaggi devono possedere localizzazioni differenti lungo il wafer. Risulta quindi necessario fare in modo che i processi di drogaggio non interessino il wafer nella sua interezza, ma soltanto alcune parti distinte.

È possibile ottenere tale risultato mediante la tecnologia planare, la quale si compone di più fasi. Una prima fase prevede la crescita di uno strato di ossido sulla superficie del wafer, ottenibile riscaldandolo all'interno di un forno in presenza di vapore acqueo e ossigeno. In seguito si effettua il processo fotolitografico, il quale impiega tecniche assistite al computer per disegnare il pattern delle finestre da aprire sulla superficie del wafer, in corrispondenza delle quali si intende effettuare il drogaggio. Attraverso tecniche fotografiche si riduce il disegno che viene quindi trasferito su una maschera di materiale vetroso, detta reticolo. Quest'ultima costituisce una sorta di negativo, riportando con zone opache le parti dell'ossido da asportare. A questo punto si depone sulla superficie una pellicola di sostanza sensibile alla luce (*fotoresist*), che possiede la proprietà di polimerizzare, ovvero divenire una sostanza resistente se sottoposta all'azione di raggi ultravioletti. Sopra questo strato viene deposta la maschera e il tutto viene esposto a raggi ultravioletti. Una volta asportata la maschera si elimina il *fotoresist* che non ha polimerizzato, il quale corrisponde alle zone opache della maschera, attraverso un solvente chimico. Il passo successivo prevede un attacco chimico, che ha lo scopo di rimuovere gli strati di ossido non coperti dal *fotoresist* polimerizzato, lasciando infine scoperte le zone del wafer che si intende drogare.

3.6 Struttura del modulo fotovoltaico in silicio

I moduli in silicio mono o policristallino rappresentano tecnologie costruttivamente simili e prevedono che ogni cella fotovoltaica sia cablata in superficie mediante una griglia di materiale conduttore, che permetta di canalizzare gli elettroni.

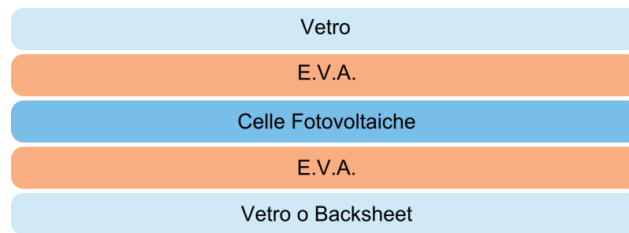
La superficie posteriore di supporto viene in generale realizzata con un materiale isolante di scarsa dilatazione termica, come il vetro temperato o un polimero. Sopra di esso vengono appoggiati diversi elementi, ovvero un sottile strato di acetato di vinile (spesso indicato con la sigla EVA), la matrice dei moduli, preconnessi mediante nastri metallici (in modo da formare serie e paralleli elettrici) e un secondo strato di acetato di vinile. Infine viene depositato un materiale trasparente che funge da protezione meccanica anteriore, spesso in vetro temperato. Al fine di garantire una maggiore trasparenza un vetro di questo tipo presenta un basso contenuto di ferro e lascia passare circa il 91,5% dell'irraggiamento ricevuto.

Il prodotto così ottenuto viene inviato al laminatore (o forno), una macchina nella quale sono ricreate le condizioni di vuoto e una piastra posta a contatto con il laminato è riscaldata fino a 145°C per circa dieci minuti. Una volta trascorso questo tempo, tale procedimento di pressofusione favorisce la polimerizzazione dell'EVA, trasformandolo in collante inerte. In seguito il prodotto estratto viene mandato alle lavorazioni successive, dove le terminazioni elettriche dei nastri vengono chiuse in una morsettiera stagna, generalmente fissata sulla superficie di sostegno superiore. Tutti questi strati di materiali diversi sono quindi fissati a una cornice in alluminio, la quale diverrà utile al fissaggio del pannello alle sue strutture di sostegno e all'orientamento verso il sole.

Il modulo fotovoltaico così realizzato appare come un "sandwich" di materie prime, detto laminato, e di materiali accessori atti a renderlo utilizzabile.

In sintesi il laminato viene costruito con la seguente stratificazione di materiali:

- Vetro (i moduli preparati in Italia abitualmente usano 4 mm di spessore);
- Etilene vinil-acetato (EVA);
- Celle mono o policristalline, con il lato fotosensibile rivolto verso il basso;
- EVA per la protezione delle celle;
- Copertura di fondo (*backsheet*).



Struttura del laminato

3.7 Prestazioni nel tempo dei moduli

Nel caso in cui la laminazione venga eseguita correttamente, il prodotto ricavato risulta capace di resistere alla intemperie per almeno 20-30 anni. Tutte le lavorazioni successive intendono rendere più comodo e pratico il suo utilizzo, incrementando in realtà di poco la sua resistenza nel tempo.

Effettuando un'approssimazione, la potenza elettrica generata da un modulo può essere derivata dalla seguente formula:

$$P = \eta I_0 \sin(\alpha) S$$

dove:

- I_0 è l'irradiazione solare incidente, espressa in Watt/m^2 ;
- α è l'angolo di inclinazione del modulo rispetto alla radiazione;
- S è la superficie del modulo;
- η è il fattore di rendimento.

In generale le prestazioni dei moduli fotovoltaici per unità di superficie risultano suscettibili a variazioni di diversi valori, quali il rendimento dei materiali, l'irraggiamento a cui le celle sono esposte, l'angolazione con cui la radiazione solare giunge alla superficie, alla composizione dello spettro di luce e alla temperatura di esercizio dei materiali.

4. Sistemi di accumulo, inverter e l'assetto SEU

I produttori manifatturieri nell'ultimo anno hanno investito molto sulla ricerca di tecniche e componenti in grado di portare a una diminuzione dei costi di produzione e, in particolare, hanno espresso un forte interessamento per i “sistemi di *Storage*” (stoccaggio). Questi infatti permettono di accumulare l'energia in esubero autoprodotta dagli impianti e riconsegnarla poi in qualsiasi momento di necessità. La rapida diffusione a cui è andato incontro il settore delle energie rinnovabili potrà favorire l'affermazione di questa pratica su larga scala in maniera sostenibile.

Il concetto di accumulo abbinato al fotovoltaico sta quindi acquisendo sempre più rilevanza, tanto che si prevede per il 2015 un mercato a loro dedicato, con prezzi convenienti per gli utenti finali. Nel resto del mondo, paesi come Germania, Stati Uniti e Australia stanno già ponendo estrema fiducia sull'Energy Storage nelle sue varie declinazioni, ritenendola una valida opportunità futura per un ulteriore sviluppo del potenziale offerto dalle energie rinnovabili e la soddisfazione del nostro fabbisogno domestico. La conservazione dell'energia autoprodotta e non autoconsumata permetterà infatti di ottimizzare non solo la produzione elettrica da fonti rinnovabili, ma anche il consumo. Recentemente in Italia sono state approvate in merito diverse delibere, contenenti le disposizioni relative all'integrazione dei sistemi di accumulo di energia nel sistema elettrico nazionale. Constatando che nel nostro Paese i prezzi riferiti all'elettricità di rete sono risultati tra i più elevati in Europa e che siamo ora giunti alla fine delle tariffe agevolanti previste dal governo, un appetibile traguardo da porsi per il nostro sostentamento energetico è offerto dalla massimizzazione dell'autoconsumo. Lo *Storage* appare quindi una materia totalmente innovativa e interessante che diverrà protagonista principale nell'immediato futuro, specialmente per quel che riguarda l'elettricità prodotta mediante il fotovoltaico.

La Confindustria Anie Energia intravede segnali positivi di ripresa per quanto riguarda il settore elettrico (più del 20% nel 2014) per merito di tali sistemi di accumulo, i cui costi sono destinati a puntare verso il basso. Pareri incoraggianti sono stati espressi anche dall'Ingegnere Luigi Mazzocchi della società RSE (Ricerca sul Sistema Elettrico), secondo cui i sistemi di accumulo si dimostreranno fondamentali per il mantenimento di un buon livello di installazioni di nuovi impianti, in particolar modo

fotovoltaici, i quali ora non possono più godere degli incentivi statali. Egli fa inoltre notare che sul mercato globale stanno già approdando al riguardo diverse soluzioni promettenti.

Al centro di questa tipologia di sistemi troviamo l'inverter, per il quale la maggior parte delle aziende condivide la previsione di un aumento del 20% della sua presenza integrata con l'accumulo nel 2015.

Una forte attesa viene anche manifestata nei confronti della nuova normativa SEU (Sistemi di Efficienza d'Utenza) che dovrebbe consentire lo sviluppo dei dispositivi integrati inverter-batterie adatti al settore domestico, del piccolo terziario e delle medie imprese. Questi soggetti potrebbero infatti ricavare molti benefici da questa tipologia di sistemi.

4.1 Batterie di accumulo per impianti fotovoltaici

4.1.1 Tipologie di sistemi di accumulo

Le batterie di accumulo permettono di immagazzinare energia generata in eccesso dal fotovoltaico, in modo da poterla riutilizzare successivamente nei momenti di richiesta in cui l'impianto non produce energia (ad esempio durante la notte o nei momenti di basso irraggiamento solare). Questi dispositivi sono essenzialmente degli accumulatori di tipo elettrochimico, che prevedono lo stoccaggio dell'energia autoprodotta da rendere poi rendere disponibile dal punto di vista temporale in maniera differita rispetto alla sua produzione. Sono state finora prodotte una vasta gamma di soluzioni, riconducibili essenzialmente alle seguenti tipologie costruttive:

- Batterie al Piombo;
- Batterie agli Ioni di litio;
- Batterie al Nichel-metallo-idruro;
- Batterie al Nichel-Cadmio;
- Batterie con tecnologie ad alta temperatura.

In generale tutte queste categorie di dispositivi devono garantire un funzionamento continuo dell'impianto ed evidenziare una costante capacità ad accumulare ed erogare

energia elettrica in piccole o grandi quantità. Devono inoltre essere caratterizzate da costi ridotti, limitata necessità di manutenzione in esercizio e lunga durata della loro funzionalità.

Per una famiglia media di 2-3 persone solitamente il fabbisogno durante le ore serali/notturne si aggira attorno ai 4,5 kWh, tuttavia in base al tipo di batteria adottata si potranno perseguire soluzioni differenti. Riportiamo qui di seguito una tabella che opera un confronto tra le caratteristiche positive e negative distintive dei diversi tipi di batteria.

TIPO DI BATTERIA	VANTAGGI	SVANTAGGI
al Piombo	Diffuse, economiche e robuste Buoni rendimenti di carica/scarica e rapporto prestazioni/prezzo	Pesanti e ingombranti
agli Ioni di litio (Li-Ion)	In continua evoluzione tecnologica per migliorarne le prestazioni. Durata più elevata rispetto a quelle al piombo. Molto diffuse	Costo più elevato
al Nichel- metallo – idruro (NiMH)	Capacità doppia o tripla di un batteria NiCd di pari dimensioni.	Densità volumetrica di energia è minore delle batterie Li-Ion
al Nichel- cadmio (NiCd)	Possibilità di carica e funzionamento anche a basse temperature	Bassa densità di energia

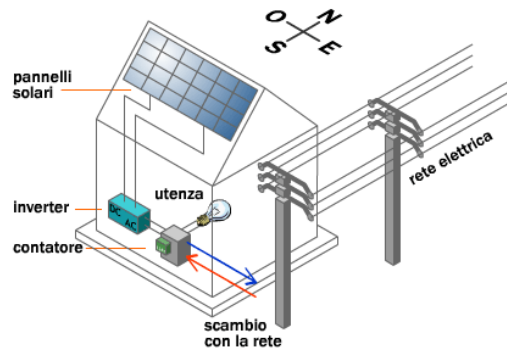
I principali sistemi installati rientrano nelle categorie di batterie al piombo e al litio. Le prime durano mediamente cinque anni e rappresentano la soluzione più economica, anche se meno efficiente. Per esse, si calcola infatti il 50% di utilizzo. Per aiutarci nella comprensione di quest'ultima affermazione, si considera che per il valore di fabbisogno precedentemente menzionato, equivalente a 4,5 kWh, risulterà necessario provvedere a un accumulo da 9 kWh, poiché il sistema durante la fase di caricamento e scaricamento trattiene circa il 50% di energia al fine di evitare il danneggiamento delle batterie. Per quanto riguarda invece le batterie al litio si considera un utilizzo dell'80%. Riprendendo l'esempio precedente, l'accumulo necessario sarà pari a 5,7

kWh. Questa tipologia di batteria è quindi caratterizzata da un costo maggiore, ma garantiscono una migliore efficienza. Inoltre coprono dieci anni di funzionamento contro i cinque delle batterie al piombo.

I sistemi di accumulo devono in ogni caso soddisfare specifiche tecniche diverse, adatte alla tipologia di impianto fotovoltaico progettato. Infatti, considerando un'installazione residenziale, questa può essere collegata alla rete elettrica pubblica oppure offrire un servizio isolato. Nel caso di batterie montate su un impianto *grid-connected* (finalizzate all'autoconsumo e alla diminuzione dei costi in bolletta), esse non interrompono il loro funzionamento nemmeno in caso di mancata fornitura energetica proveniente dalla rete (come blackout). Questa tipologia di accumulo viene anche chiamata "Riutilizzatore Energetico", ed è dotata di batterie e un meccanismo per la gestione energetica che guarda alle necessità dell'utente. Il dispositivo prevede infatti una centralina di controllo elettronico di tipo intelligente in grado di valutare se l'energia prodotta in surplus debba essere immagazzinata nelle batterie, oppure incanalata nella sezione di autoconsumo o immissione in rete, per fruire della tariffa incentivante. Nel caso in cui il fabbisogno energetico dell'abitazione lo richieda, il componente preleva l'energia necessaria dalla rete. Attraverso invece un regolatore il sistema stabilisce la carica delle batterie, evitando dannosi sovraccarichi. Tutti questi componenti devono essere ovviamente dimensionati in maniera proporzionale all'impianto, alle batterie e al rapporto potenza/quantità dei consumi elettrici.

L'elettricità pulita derivante dall'impianto è in sintesi dirottata su vie diverse in ordine di priorità:

- Direttamente alle utenze di casa e ai carichi domestici per l'autoconsumo immediato;
- Alle batterie di accumulo per l'autoconsumo differito;
- Alle rete elettrica (se previsto dal progetto e quando le batterie sono cariche) per la sua valorizzazione attraverso lo "scambio sul posto".



Schema di collegamento di un sistema di accumulo

Questo controllo è effettuato tramite software dedicato, che svolge le funzioni necessarie a rendere la residenza il più possibile autonoma dal punto di vista energetico.

4.1.2 Vantaggi offerti da un sistema a batterie

I sistemi di accumulo costituiscono uno strumento molto importante per la stabilizzazione dell'energia elettrica prodotta, permettendo di migliorare sensibilmente la trasmissione elettrica e ottimizzare i consumi. Le fonti rinnovabili annoverano, come già citato, numerosi vantaggi, tra cui l'assenza di emissioni di gas serra, la sua gratuità e la caratteristica di rigenerarsi, ma l'energia da loro prodotta risulta discontinua. Infatti la produzione energetica non è garantita in qualsiasi momento della giornata, mentre tendenzialmente il fabbisogno e il consumo di energia risulta di tipo continuo. Le batterie intendono risolvere proprio questa problematica.

I benefici derivabili da questi sistemi non risiedono solamente nel miglioramento del consumo energetico delle singole abitazioni, ma anche nella praticità dell'abitazione stessa. Tramite le batterie ad accumulo risulta infatti possibile accedere alla tariffa premio di autoconsumo, la quale regala 0,16 € per ogni kW prodotto. Questa agevolazione determina delle ricadute sulla bolletta, all'interno della quale i risparmi sui costi energetici possono raggiungere anche il 100% in alcuni periodi dell'anno. Inoltre garantisce un'autonomia energetica all'abitazione nei confronti della rete elettrica, andando a costituire una fonte di scorta a cui rivolgersi nel momento in cui non si ha a disposizione energia da autoconsumare. Infine il sistema intelligente di controllo di cui è dotato l'impianto offre una garanzia di flusso costante di elettricità, nonostante la discontinuità di cui si caratterizzano le fonti rinnovabili, poiché in grado

di distinguere i momenti in cui è possibile sfruttare l'energia autoprodotta da quelli in cui risulta necessario prelevarla dalla rete elettrica.

4.1.3 Benefici garantiti in un impianto domestico

I sistemi di accumulo a batterie sono studiati e progettati in modo tale da rendere una singola abitazione autosufficiente. Impiegando queste batterie di accumulo è possibile garantire un risparmio agli utenti, riducendo sensibilmente il consumo dell'energia proveniente dal gestore elettrico. Non essendo sempre possibile sfruttare l'impianto durante le ore di maggiore produzione (soprattutto quando si trascorre poco tempo nella propria abitazione durante il giorno) conservare l'energia autoprodotta rappresenta una valida soluzione per garantire il consumo energetico in qualsiasi momento, senza vedersi costretti a prelevare energia dalla rete. Basti pensare che per un impianto fino a 20 kW è prevista una tariffa premio per l'autoconsumo di 0,16 €, mentre l'energia venduta in rete presenta un costo di 0,21 €. Il guadagno risiede quindi nell'autoconsumo di tutta l'energia prodotta dal proprio impianto, che tra l'altro risulta pulita e gratuita.

Secondo quest'ottica il proprietario del sistema fotovoltaico diventerebbe egli stesso un produttore di energia elettrica. Un utente che si vuole rendere completamente autosufficiente e indipendente dal suo gestore elettrico non può quindi fare a meno di valutare la soluzione offerta dai sistemi di accumulo per conservare tutta l'energia prodotta dall'impianto. Le batterie per gli impianti fotovoltaici, infatti, permettono non solo di ottimizzare la produzione elettrica, ma soprattutto di non lasciare nessun kW prodotto inutilizzato. Lo stesso meccanismo può inoltre ridurre l'impatto ambientale, limitando le immissioni in rete, e risolvere anche i problemi legati alle congestioni sulla rete stessa.

Alcuni studi effettuati sul consumo dell'energia elettrica prodotta da un impianto fotovoltaico domestico hanno dimostrato come una famiglia, anche rimanendo in casa durante tutte le ore del giorno, non riesca ad autoconsumare una quota di energia superiore al 30-40%: la parte generata in eccesso, se non si è dotati di un adeguato sistema di accumulo, viene obbligatoriamente ceduta alla rete.

4.2 Inverter fotovoltaici

4.2.1 Inverter per immissioni in rete

L'inverter rappresenta un componente indispensabile per quanto riguarda gli impianti fotovoltaici connessi in rete. Un inverter generico infatti converte l'energia elettrica prodotta, che si presenta sotto forma di corrente continua, in corrente alternata, rendendo così possibile la sua immissione diretta nella rete elettrica.

È stato negli ultimi anni progettato un particolare inverter che estende la funziona base appena descritta con nuove strutture sofisticate e all'avanguardia. Questo tipo di dispositivo impiega specifici sistemi di controllo hardware e software, i quali consentono di estrarre dai pannelli solari la massima potenza a disposizione in qualsiasi condizione meteorologica. Tale funzionalità prende il nome di MPPT (Maximum Power Point Tracker). I moduli fotovoltaici risultano caratterizzati da una curva caratteristica V/I per cui esiste un punto ottimale dal quale è possibile estrarre il più alto valore di potenza disponibile. Questo punto non si presenta fisso, ma varia continuamente in funzione del livello di radiazione solare che colpisce la superficie delle celle. Un inverter capace di restare "agganciato" a tale punto garantisce che i moduli funzionino sempre al massimo delle loro prestazioni.

Esistono svariate tecniche di realizzazione della funzione MPPT, le quali si differenziano per prestazioni dinamiche (tempi di assestamento) e accuratezza. Sebbene la precisione del sistema MPPT rappresenta un valore specifico estremamente importante, in alcuni casi il tempo di assestamento appare ancora più caratteristico. Quasi tutti i produttori di inverter sono infatti in grado di ottenere una accuratezza dell'ordine del 99%, tuttavia solo in pochi emergono per la loro capacità di unire la velocità alla precisione. Infatti durante le giornate con nuvolosità variabile non è raro che si verifichino sbalzi di potenza ampi e repentini, con variazioni che possono andare da 100 W/m^2 a 1000 W/m^2 in meno di pochi secondi. In queste condizioni un inverter caratterizzato da tempi di assestamento minori di cinque secondi è in grado di produrre fino al 5-10% di energia in più rispetto a uno lento.

Un'altra funzione generalmente integrata nel dispositivo è l'interfaccia di rete, la quale deve rispondere a requisiti imposti dalle normative dei diversi enti di erogazione

elettrica. Esso quindi effettua un monitoraggio costante della rete pubblica e diviene responsabile del rispetto dei diversi criteri esposti nelle normative. In particolare in Italia è stata rilasciata in merito la norma CEI 0-21, che prevede una serie di misure di sicurezza tali da evitare l'immissione in rete dell'energia qualora i parametri risultino fuori dai limiti di accettabilità.

Gli impianti isolati, come ad esempio piccole utenze fuori portata o imbarcazioni, possono anche fare a meno dell'inverter. In questo caso occorre predisporre il carico e le batterie in modo da essere alimentati direttamente in corrente continua a bassa tensione.

4.2.2 Funzionalità garantite da un inverter

In generale un inverter adempie e garantisce numerose funzioni. In primo luogo regola la frequenza e la tensione dell'energia elettrica. Per quanto riguarda la connessione in rete invece protegge il sistema da cortocircuiti e sovratensioni. Infine il dispositivo monitora il funzionamento dell'impianto fotovoltaico e segnala eventuali guasti interni individuati.

La trasformazione da corrente continua in alternata deve essere effettuata con basse perdite. L'inverter fotovoltaico, grazie alla funzionalità Maximum Power Point, è in grado di trovare e mantenere costantemente il punto di funzionamento ideale sulla curva caratteristica dei moduli, al fine di conseguire in ogni situazione la potenza maggiore disponibile.

Durante il monitoraggio della rete di alimentazione, alla quale risulta collegato, è in grado di disinserire immediatamente l'impianto in caso si registrino anomalie, oppure contribuire al supporto di essa in base ai requisiti del gestore locale. Questo controllo viene effettuato grazie alla presenza sull'inverter di interfacce di comunicazione, le quali consentono la verifica dei parametri di funzionamento e dei rendimenti. Sul grado di rendimento può influire la temperatura: se il suo valore infatti aumenta eccessivamente l'inverter riduce la potenza. Per questo motivo in alcune circostanze non risulta possibile sfruttare appieno la potenza di un modulo. Il valore di temperatura può venire a dipendere da un lato dal luogo di montaggio (l'ideale sarebbe un ambiente uniformemente fresco), dall'altro dal funzionamento dell'inverter. Appare

quindi particolarmente importante un raffreddamento efficiente e affidabile dell'involucro.

4.2.3 Classificazioni degli inverter

Sul mercato sono disponibili innumerevoli inverter fotovoltaici che possono essere distinti in base a tre caratteristiche fondamentali: la potenza, la connessione dei moduli sul lato CC e la tipologia.

I valori tipici di potenza ammontano a 5 kW per gli impianti residenziali su tetto, da 10 a 20 kW per quelli commerciali e, infine, per l'impiego destinato a centrali fotovoltaiche si registrano valori che vanno da 500 a 800 kW.

Durante il dimensionamento sul lato CC occorre tenere in considerazione la connessione dei moduli fotovoltaici all'inverter. In questo contesto è possibile operare una distinzione fra inverter di stringa, multistringa e centrali, dove con il termine "stringa" si indica una fila di moduli fotovoltaici collegati in serie. Gli inverter centrali sono particolarmente idonei per grandi impianti e, nonostante la loro grande potenza, possiedono un unico inseguitore MPP. Gli inverter multi stringa, invece, dispongono invece di due o più entrate con inseguitore MPP dedicato e sono raccomandabili nel caso in cui il generatore fotovoltaico sia composto da numerose superfici parziali o in parte ombreggiate.

È infine possibile classificare gli inverter in monofase e trifase. I primi sono solitamente applicati in impianti di piccole dimensioni, mentre per installazioni grandi è opportuno impiegare inverter trifase o in alternativa gruppi di più inverter monofase.

4.2.4 Dimensionamento dei componenti

Per la scelta e il cablaggio dei moduli la progettazione dell'impianto deve tenere in accurata considerazione la scelta dell'inverter adatto sotto il profilo della potenza e della tecnologia. La potenza nominale del generatore solare può superare fino al 10% quella nominale dell'inverter. Un ulteriore sottodimensionamento invece influisce negativamente sul rendimento dell'impianto, poiché l'inverter non sarebbe in grado di elaborare una parte della potenza offerta dal modulo in caso di irraggiamento superiore. Risulta inoltre fondamentale che la tensione CC massima non superi mai la

tensione d'ingresso consentita, altrimenti si potrebbero determinare possibili danni all'inverter.

In linea di massima occorre tener presente che quasi ogni impianto fotovoltaico costituisce un pezzo unico e deve, di conseguenza, essere dimensionato in base all'ubicazione e ai requisiti richiesti. Per facilitare agli installatori la progettazione di un impianto fotovoltaico molti produttori professionisti (come SMA) mettono a disposizione appositi strumenti che, tramite il software gratuito *Sunny Design*, permettono il dimensionamento di un impianto accoppiato alla rete su misura per il suo cliente. Per adempiere a tale scopo il programma ricorre a una banca dati contenente tutti i moduli attuali e alle previsioni meteo ad alta definizione. Sulla base di queste informazioni verifica i componenti tecnici, calcola lunghezza e diametri dei cavi e, infine, esegue una valutazione economica dell'installazione.

4.2.5 Micro inverter

Una nuova frontiera tecnologica è offerta dai microinverter. Questi dispositivi svolgono la funzione degli inverter tradizionali, ma, a livello di impianto, sono collegati a un singolo modulo anziché a una stringa. Per questa ragione sono chiamati anche mini inverter e vengono progettati con una potenza inferiore (250 kW) rispetto ai valori conseguiti dagli inverter classici. Il principio di funzionamento del micro inverter è quello di usufruire del massimo potenziale associabile al punto di lavoro di ogni singolo pannello a cui è connesso, in modo da ottimizzarne la produzione energetica indipendentemente dagli altri pannelli fotovoltaici. Questo risultato viene ottenuto attraverso il già descritto sistema MPPT destinato all'inseguimento della potenza massima in uscita.

In sintesi, i vantaggi offerti dal micro inverter sono da attribuirsi, oltre alle dimensioni miniaturizzate e alla bassa dissipazione di potenza, al controllo (esercitato sul singolo pannello) in termini di efficienza e funzionamento della potenza erogata. Inoltre facilitano i collegamenti di tipo parallelo fra moduli solari e, in caso di anomalie, favoriscono la ricerca e la riparazione del guasto rilevato senza dover ricorrere all'interruzione del funzionamento dell'intero impianto.

All'interno della tabella che segue operiamo un confronto tra i benefici perseguibili con questa nuova tipologia di inverter rispetto a quelli tradizionali.

Vantaggi dei micro inverter	Micro inverter vs Inverter tradizionali
Controllo 1-1 di moduli fotovoltaici	Dimensioni e potenza ridotte
Facilità di espandere impianto	Vita media più elevata
Bassa dissipazione di potenza	Massimizzazione dell'efficienza MPPT
Collegamento moduli in parallelo	Collegamento in parallelo invece che in serie
Funzionamento modulo FV a massima potenza	Minor sensibilità a ombreggiamento
Indipendenza da altri moduli	Miglior sfruttamento potenza del modulo (fino a 25% in più)
Facilità di ricerca del modulo difettoso in caso di guasto	Maggior velocità di risposta
Buona affidabilità	Maggior facilità di installazione
Elevata vita media e durata	Ottimizzazione potenze in gioco e scelta potenza idonea anche a piccoli / medi impianti
Monitoraggio singoli pannelli	Conversione DC/AC direttamente sul tetto

4.3 Sistemi SEU

I sistemi di accumulo annoverano tra le varie funzionalità quella di fungere da principale tecnologia abilitante per lo sviluppo delle installazioni fotovoltaiche in regime SEU. Come abbiamo già menzionato nei paragrafi precedenti, l'impiego del fotovoltaico in autoconsumo sta attirando l'attenzione di grandi operatori di energia convenzionale, i quali, oltre a occuparsi della vendita di energia, intendono in futuro offrire tra i loro servizi integrati in ambito residenziale tale configurazione energetica. Questi sistemi permettono di realizzare, in particolare, un modello di business per la realizzazione del fotovoltaico senza ricorrere a incentivazioni statali. Si attende quindi una decisa crescita ed espansione del segmento SEU. Nello specifico questo acronimo indica i Sistemi Efficienti di Utenza, formati dall'unione di uno o più impianti, installati in uno stesso sito, la cui produzione è da destinarsi a un unico consumatore.

In questo modo si mette insieme una produzione più ampia che garantisce l'autoconsumo sul luogo stesso, all'interno del quale produttore e consumatore possono risultare anche soggetti diversi. Il vantaggio ottenibile con queste configurazioni è consistente: tale assetto permette di non pagare in bolletta gli oneri di trasmissione e distribuzione né quelli generali di sistema. Il risparmio di energia elettrica per il consumatore raggiunge quasi la metà del costo rispetto a quella prelevata dalla rete, costituendo quindi un incentivo indiretto. Purtroppo l'utilizzo di questo particolare modello non è stato finora consentito a strutture di grandi dimensioni, quali centri commerciali e ospedali, rallentandone lo sviluppo. In ogni caso nell'ultimo anno i produttori hanno investito molte risorse nella ricerca in tale campo e dal 2015, grazie a nuove predisposizione normative, si prevede sussisterà un solido mercato dello *storage* abbinato al fotovoltaico. Nel dettaglio, secondo una recente analisi di settore riferita al 2013, sono risultati 700 i MW di impianti fotovoltaici installati fuori dal regime incentivante e tale quota corrisponde a un potenziale assetto SEU, considerando la loro taglia media.

CAPITOLO II - POLITICA AMBIENTALE E CONTESTO NORMATIVO

Situazione legislativa attuale, direttive, norme, accordi

1. Il ruolo del Governo nella tutela ambientale

L'intervento istituzionale più significativo di questi ultimi anni che ha interessato il settore fotovoltaico è stato quello di inserire i pannelli solari nell'elenco dei rifiuti RAEE (Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche), indicato nel testo della nuova direttiva europea. Per la prima volta i moduli fotovoltaici vengono quindi citati come rifiuti, per il quale è necessario predisporre un trattamento finalizzato al loro recupero e alla loro valorizzazione secondo un quadro normativo omogeneo. La normativa prevede che al momento dell'acquisto sia versata una quota destinata allo smaltimento successivo del prodotto una volta cessato il suo ciclo di vita. Da parte del governo tale azione dimostra l'intenzione di mettere in piedi una serie di soluzioni atti a risolvere le problematiche quantitative e qualitative derivanti dai rifiuti fotovoltaici. La loro crescita esponenziale, dovuta all'ampia diffusione, e la tipologia di materiale in essi contenuto (elementi recuperabili o nocivi) hanno evidenziato la necessità di intervenire con urgenza nella progettazione orientata al loro fine vita. Segnali positivi provengono anche dalle aziende produttrici e dagli Enti locali strutturati, i quali si stanno dimostrando soggetti attivi nell'ottimizzazione dei modelli di raccolta e nel recepimento delle normative.

L'importanza del contributo fornito dall'emanazione di una normativa adeguata rivolta alla tutela ambientale è emersa per la prima volta dalla redazione del rapporto Brundtland da parte della Commissione Mondiale su Ambiente e Sviluppo nel 1987. Tale documento ha deposto le basi per lo sviluppo del diritto internazionale ambientale, sottolineando il legame che intercorre tra lo sviluppo economico e la tutela

dell'ambiente ed evidenziando la necessità di rendere questi due aspetti compatibili. A soluzione delle problematiche evidenziate si avanzano proposte che Governi, Organizzazioni internazionali, ma anche i singoli cittadini dovrebbero mettere in atto. Questo particolare modello di crescita introduce il concetto di “sviluppo sostenibile”, secondo il quale occorre dar vita a una forma di sviluppo presente che non intacchi l'ambiente al punto da compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare le proprie esigenze di godimento delle risorse naturali. Ne consegue la necessità di un innovativo modo di gestione delle relazioni economiche tra Stati che garantisca un impiego responsabile delle risorse, sfruttando quelle non rinnovabili in maniera tale da non causarne il rapido esaurimento e tenendo in considerazione la capacità di rigenerazione delle rinnovabili al fine di evitare il loro progressivo logoramento.

Da quel momento in avanti la consapevolezza della necessità di progettazione di uno sviluppo sostenibile ha influenzato tutta la produzione normativa, facendo emergere il ruolo essenziale ricoperto dalle politiche governative, le quali devono considerare strumenti e misure per la protezione ambientale e dell'intero ecosistema.

La crescente diffusione delle energie rinnovabili presuppone quindi una continua ricerca di leggi che regolamentino non solo la sua integrazione architettonica, l'impatto visivo nullo e la garanzia di durevolezza della produzione energetica (per almeno 25-30 anni), ma soprattutto la sua destinazione al termine del servizio.

1.1 Strumenti di politica ambientale

I mezzi attraverso i quali è possibile attuare politiche ambientali si suddividono in tre macro categorie:

- Strumenti di regolazione diretta di tipo normativo;
- Strumenti economici, come ad esempio tasse ambientali e incentivi fiscali, mediante i quali il raggiungimento degli obiettivi previsti avviene orientando il comportamento dei diversi attori sulla questione ambientale;
- Strumenti volontari, attraverso i quali applicare sia regole legislative che strumenti economici.

Gli strumenti normativi sono stati i primi ad essere applicati e a essi sono poi succeduti gli altri. La politica ambientale è quindi andata incontro a un'evoluzione nel corso degli anni. L'azione della Comunità europea in materia inizia intorno agli anni '70, periodo in cui cominciano ad emergere le prime emergenze ambientali, a cui si tenta di porre rimedio tramite interventi di natura legislativa (emanazione di norme). Iniziano dunque a essere elaborati veri e propri Programmi d'azione fino ad arrivare all'anno 1993, il quale segna un momento decisivo nell'evoluzione degli strumenti con cui attuare la politica ambientale comunitaria. Nell'elaborazione del documento viene infatti posta enfasi sul già citato concetto di sviluppo sostenibile, il quale può concretizzarsi solo in presenza di una forte responsabilità condivisa per la protezione dell'ambiente. La tradizionale regolamentazione non appare più sufficiente per raggiungere gli obiettivi ambientali prefissati e si richiede un più intenso e attivo coinvolgimento di tutti i soggetti coinvolti nella tutela. Inoltre si introducono nuovi strumenti d'attuazione complementari ai precedenti, che sottolineano l'importanza dei principi della prevenzione e precauzione nell'affrontare la questione ambientale, richiedendo implicitamente una inversione nella tendenza dei comportamenti delle imprese: da attori passivi della politica ambientale a soggetti attivi e promotori di iniziative finalizzate alla minimizzazione dell'impatto ambientale. In questo contesto hanno suscitato interesse gli strumenti volontari e gli accordi ambientali quali mezzi a disposizione per integrare la tutela dell'ambiente nelle strategie e sistemi di gestione delle imprese.

Nell'ambito di questa crescente tendenza alla cooperazione tra pubblica amministrazione e imprese si sono sempre più affermati come strumenti di politica ambientale, e più in generale di politica industriale, gli **accordi volontari**. Essi possono essere definiti come strumenti di governo e di pianificazione ambientali realizzati generalmente tra soggetti pubblici e privati. La definizione degli obiettivi da raggiungere deriva da un processo di negoziazione in cui una parte deve essere necessariamente una Autorità pubblica, la quale riconosce l'impegno assunto nella protezione ambientale dalla controparte industriale. Questo riconoscimento rappresenta un elemento di forte differenziazione di questi strumenti da altri di carattere unilaterale.

Dal punto di vista formale gli accordi costituiscono dei contratti che possono includere l'eventualità di sanzioni da applicare e il diritto di procedere in termini di ricorso. Entrambi le parti realizzano uno scambio volontario di impegni: da un lato il soggetto economico si adopera per realizzare quanto previsto, dall'altro il soggetto pubblico è chiamato a intervenire al fine di agevolare le azioni dell'industria. Rispetto ad altri strumenti volontari, gli accordi si contraddistinguono per la loro flessibilità in merito alla scelta delle risorse e della priorità da rispettare.

Recentemente l'Università Bocconi ha condotto una ricerca che esamina le modalità di sviluppo degli accordi volontari in Italia, confrontandole con quella di altri Paesi europei (sulla base di una recente indagine dell'Agenzia Europea per l'Ambiente) e statunitense. Sono stati analizzati alcuni casi emblematici a livello nazionale e locale, che vedono coinvolti grandi imprese, associazioni industriali e consorzi. Da questa valutazione emergono importanti differenze con gli altri Stati, ma anche punti in comune, come il ruolo critico svolto dai sistemi di controllo e, più in generale, dalle modalità di gestione dell'informazione. È stato dunque evidenziato come contributo rilevante l'evoluzione del quadro normativo - istituzionale, sia a livello nazionale che comunitario. È tutt'ora in corso uno sforzo di formalizzazione degli accordi volontari che intende garantire un loro impiego più equo, senza comprometterne la flessibilità. Si tratta dunque di una dinamica ancora fluida, i cui esiti possono determinare un impatto rilevante sulla competitività del sistema industriale nazionale.

Nell'ambito delle energie rinnovabili, un importante accordo stipulato nel nostro Paese è stato quello realizzato nell'ottobre del 2011 tra il Comitato IFI² e il consorzio Cobat, il quale sancisce la volontà di istituire una filiera completamente italiana per la raccolta, il riciclo e lo smaltimento dei pannelli fotovoltaici. Esso rappresenta un'intesa storica per il futuro dell'energia solare in Italia.

Recentemente è stato inoltre siglato un nuovo programma tra ANCI (Associazione Nazionale Comuni Italiani) e il Centro di Coordinamento RAEE Rifiuti, che prevede importanti novità per la gestione dei rifiuti. In primo luogo sono state introdotte alcune

² Il comitato IFI (Industrie fotovoltaiche Italiane) è un'associazione di aziende manifatturiere, italiane e straniere, che rappresenta l'80% della capacità produttiva di celle e moduli fotovoltaici nel nostro Paese. In generale promuove lo sviluppo del settore fotovoltaico e mira a realizzare un sistema armonico, capace di coprire la sempre più crescente domanda di prodotti, all'interno della quale le aziende possano operare in un'ottica di competitività globale.

semplificazioni delle procedure operative e nuove regole per l'accesso ai premi di efficienza, i quali coincidono con corrispettivi in denaro concessi dai Sistemi Collettivi per sostenere le scelte organizzative dei Centri di Raccolta Comunali. È stato infine confermato un fondo destinato al loro adeguamento e potenziamento da parte dei Sistemi Collettivi con un contributo di 5 € per ogni tonnellata premiata. L'accordo rappresenta quindi la conferma di una solida collaborazione che vede gli Enti Locali lavorare a fianco dei Sistemi, al fine di rendere la raccolta efficace e capillare.

1.2 Programmi europei

In campo ambientale la Commissione Europea ha realizzato la proposta di istituire un programma generale di azione dell'Unione per il 2020 che reca il titolo "Vivere bene entro i limiti del nostro pianeta". Questo costituisce il Settimo Programma proposto in materia e intende proseguire i lavori già compiuti per orientare lo sviluppo della politica istituzionale. Esso garantisce la definizione di un quadro strategico per la tutela ambientale nell'Unione Europea, che soddisfi i requisiti di complementarità delle politiche e parità di condizioni tra gli Stati membri. Intende quindi stimolare all'azione tutti i livelli governativi ai fini di un processo decisionale più efficace ed efficiente.

Il programma si fonda su principi innovativi per il settore ambientale: prevenzione e precauzione, riduzione dell'inquinamento alla fonte e il concetto "Chi inquina paga". Nel panorama generale si propone di raggiungere una migliore qualità della vita e un determinato grado di benessere dei cittadini. Gli obiettivi prioritari sono stati ridefiniti tenendo conto del fallimento del precedente programma, considerato essere stato eccessivamente ambizioso nella scelta delle mete e nell'analisi della realtà attuale, e fra questi si individuano nove priorità:

1. Conservare e migliorare il capitale naturale dell'Unione europea;
2. Trasformare l'Unione in un'economia a basse emissioni di carbonio;
3. Proteggere i cittadini da rischi ambientali per la salute;
4. Sfruttare al massimo i vantaggi derivanti dalla legislazione in materia di ambiente, migliorandone l'applicazione;

5. Migliorare le basi cognitive e scientifiche della politica ambientale;
6. Garantire investimenti a sostegno delle politiche;
7. Aumentare l'integrazione ambientale con la coerenza delle politiche;
8. Incrementare la sostenibilità delle città;
9. Migliorare l'efficace dell'azione nell'affrontare le sfide ambientali e climatiche a livello internazionale.

La commissione europea ritiene necessario effettuare sistematiche valutazioni ex-ante dell'impatto ambientale, sociale ed economico alle iniziative politiche a livello dell'Unione e di ciascun Stato membro, al fine di garantire la coerenza e l'efficacia nel rispetto del programma. Spesso i maggiori ostacoli al raggiungimento degli obiettivi non sono rappresentati dalle eventuali tecnologie obsolete messe a disposizione dalla scienza, ma dall'inadeguatezza di alcune burocrazie locali, le quali risultano troppo macchinose e lente nel recepire le novità. L'assunzione di serie politiche tese alla riduzione degli impatti non appare diffusa perché, prima di tutto, è essenzialmente volontaria e, soprattutto, risulta affermata una prassi interamente obsoleta che causa uno sfruttamento delle risorse naturali come se fossero illimitate e determinando, in questo modo, un impoverimento irreversibile della Terra.

1.3 Società e Consorzi

Figura centrale nell'incentivazione e sviluppo delle fonti rinnovabili in Italia è la società Gestore dei Servizi Energetici (GSE) controllata dal ministero dell'Economia e delle Finanze, la quale svolge attività di informazione per promuovere e incentivare l'uso dell'energia compatibile e sostenibile con le esigenze ambientali. Tale organo è stato istituito dallo stato italiano al fine di gestire il meccanismo degli incentivi economici destinati al fotovoltaico (introdotti con il decreto "Primo Conto Energia"). In particolare qualifica gli impianti, verifica gli obblighi di produttori e imprenditori, ritira e colloca sul mercato l'energia prodotta da fonti rinnovabili. Il suo impegno sempre più incisivo all'interno del contesto nazionale ha determinato il suo riconoscimento nell'attuazione delle scelte di politica energetica a livello

internazionale, sia attraverso la partecipazioni a seminari che mediante l'adesione a organizzazioni europee.

Nel nostro Paese esistono alcuni consorzi che hanno messo in piedi una filiera italiana integrata per la raccolta e il recupero dei pannelli solari, inizialmente costruita su base volontaria. Con il recepimento del IV Conto Energia era previsto che per i nuovi impianti installati il soggetto responsabile dimostrasse al GSE il possesso del certificato, rilasciato dal produttore, attestante l'adesione dello stesso a un sistema o consorzio europeo che garantisca lo smaltimento dei moduli fotovoltaici a fine vita.

Nel 2013 GSE ha reso noto il primo elenco di sistemi risultati idonei allo smaltimento dei moduli fotovoltaici. Si contano finora undici consorzi e società RAEE per il fotovoltaico:

1. COBAT – Consorzio Nazionale Raccolta e Riciclo (Roma);
2. Consorzio ECOEM (Milano);
3. Consorzio Ecolight (Milano);
4. Consorzio Eco-PV (Milano);
5. Consorzio Ecoped (Milano);
6. Consorzio Re Media (Milano);
7. E-Cycle (Napoli);
8. ERP Italia (Milano);
9. La mia Energia (Isernia);
10. PV Cycle Italia (Roma);
11. RAECycle (Siracusa).

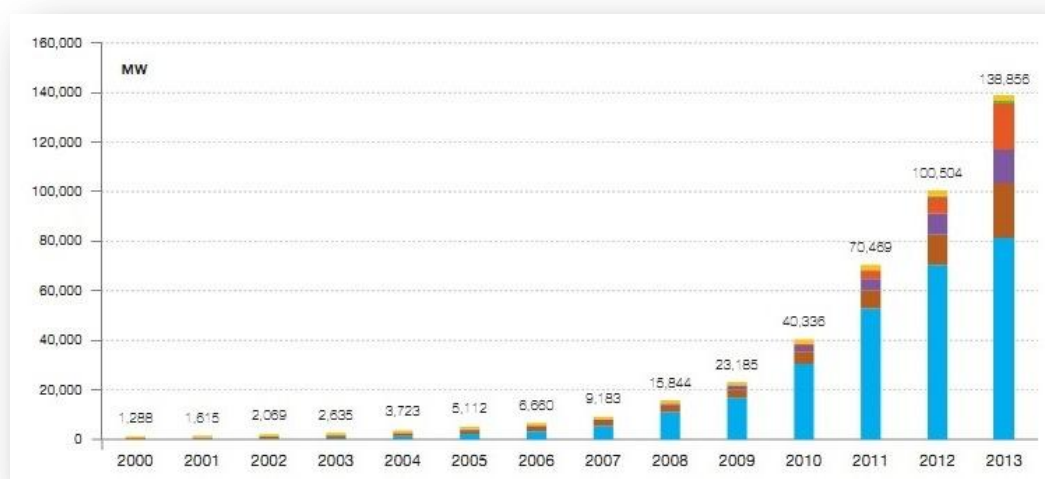
Attraverso l'adesione a uno di questi sistemi le nuove installazioni di impianti potevano usufruire degli incentivi economici statali.

1.4 Previsioni di mercato

Secondo un rapporto redatto dall'associazione EPIA (European Photovoltaic Industry Association) si stima per l'Unione Europea un mercato fotovoltaico di circa 9-11 GW l'anno, quindi in leggero declino. Tale previsione dipenderà dalle misure politiche messe in atto dai diversi governi nazionali e la loro stabilità nel tempo. Si ritiene che il

settore fotovoltaico abbia però una potenzialità molto maggiore rispetto a quanto stimato. Con l'eccezione della Germania, la quale ha previsto un atterraggio graduale senza incentivi, tutti gli altri Stati membri hanno sperimentato un'esplosione delle installazioni, anche grazie ad elevate e forse eccessive tariffe incentivanti, senza ripristinare una sufficiente fiducia nel mercato. I governi non hanno quindi saputo (o voluto) affrontare questa rapida diffusione della tecnologia accompagnandola all'apprezzamento dei suoi utilizzatori.

Andando a visualizzare i dati cumulativi in termini di potenzialità a livello globale ci rendiamo conto di quanto la crescita di questa tecnologia sia stata decisamente impetuosa. Fino a dieci anni fa, infatti, la potenza fotovoltaica nel globo risultava di appena 3,7 GW, mentre al termine del 2013 si è raggiunta la quota di 129 GW. In particolare solo nei precedenti due anni si è registrato un raddoppio di potenzialità.



Andamento delle installazioni fotovoltaiche nel mondo in termini di potenza

È tuttavia emerso anche che l'Europa ha perso per la prima volta negli ultimi dieci anni la propria leadership nella capacità fotovoltaica, superata dai paesi asiatici. I dati in calo raccolti nell'Unione europea vengono a dipendere dalle politiche governative applicate e dalle misure retroattive entrate in vigore in molti paesi. Tra queste spicca il cosiddetto decreto "Spalmaincentivi", concepito in Italia con l'obiettivo di creare la copertura economica per il compimento dell'operazione di sgravio sulle bollette dell'energia. Esso prevede una rimodulazione retroattiva e un allungamento dei tempi di erogazione degli incentivi agli impianti in produzione, oltre a oneri ulteriori

sull'autoconsumo. Per quanto riguarda il territorio italiano l'Epia ha denunciato l'illegittimità di tale misura, poiché danneggia fortemente l'immagine del nostro Paese come luogo sicuro per gli investimenti, con probabili ripercussioni a livello europeo.

2. Decreti e norme emanate

2.1 Direttiva RAEE

Le complesse dinamiche legate allo smaltimento dei pannelli solari sono state discusse inizialmente in Germania, dove l'industria fotovoltaica si è sviluppata prima. La questione deve essere però affrontata anche a livello europeo a fronte della rapida crescita delle energie rinnovabili e del fotovoltaico in particolare. Nonostante molte installazioni risultino ancora recenti, si sta assistendo in questi anni alla diffusione di un fenomeno, denominato “*revamping*”, il quale prevede la sostituzione dei moduli fotovoltaici installati in precedenza con nuovi e più performanti pannelli di ultima generazione, spesso con costi unitari inferiori. Oltre alla quantità dei rifiuti che si è ormai generata, la tematica dello smantellamento deve essere portata all'attenzione generale perché, una volta prodotti, i rifiuti non risultano omogenei. Infatti, oltre ai pannelli, includono differenti tipologie di componenti, quali inverter, intelaiature, cavi e strutture elettriche di connessione.

A tal proposito, dopo tre anni di negoziazione, nel gennaio 2012 il Parlamento europeo ha licenziato lo schema di direttiva destinato a sostituire la 2002/96/CE riguardante la gestione dei rifiuti provenienti da apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE). Il tema del riciclaggio per questa tipologia di prodotti aveva assunto un carattere di urgenza a causa della loro ampia diffusione e i cicli di vita dei prodotti sempre più ristretti. Queste apparecchiature, oltre alle materie prime e nobili riutilizzabili, possono contenere sostanze dannose sia per l'uomo che l'ambiente. La legge ha così disposto che per questa tipologia di rifiuti occorra prevedere precise procedure di recupero, evitando in questo modo destinazioni ingloriose, come la discarica.

Grazie all'attuazione della nuova direttiva 2012/19/UE i moduli solari dismessi entrano a far parte della classificazione RAEE. La nuova disposizione individua cinque raggruppamenti, rispetto alle dieci categorie previste nella precedente:

- R1 – i grandi bianchi freddi, ovvero gli elettrodomestici per la refrigerazione;
- R2 – i grandi bianchi non legati al freddo, quali lavatrici e lavastoviglie;
- R3 – Monitor e TV a tubo catodico;
- R4 – Piccoli elettrodomestici, apparecchi di illuminazione, dispositivi medici;
- R5 – Sorgenti luminose.

In particolare i pannelli fotovoltaici rientrano nel raggruppamento 4. In base alla tipologia a cui appartiene il rifiuto, esso è destinato a uno specifico trattamento di recupero e riciclo.

La nuova direttiva introduce alcune modifiche e adeguamenti al sistema di gestione previsto fino a quel momento, le quali sono entrati in vigore dal 12 aprile 2014. Gli Stati membri sono quindi stati invitati a regolamentarsi entro quella data. Diversi sono i punti salienti contenuti nel decreto legislativo:

Scopo

L'obiettivo prioritario della direttiva è quello di prevenire la produzione di RAEE e di incentivare il loro reimpiego e riciclaggio, al fine di ridurre il volume di rifiuti da smaltire.

Progettazione dei prodotti

Gli stati membri incoraggiano la produzione di apparecchiature i cui progetti facilitino e tengono in considerazione il loro trattamento e recupero.

Tassi minimi di raccolta

Oltre a estendere i campi di applicazione a più prodotti, vengono aumentati i target di raccolta, i quali nel 2016 dovranno raggiungere il 45% del peso medio delle apparecchiature immesse sul mercato e, in seguito, nel 2019 arriveranno al 65% (ovvero tre volte tanto rispetto a quanto viene raccolto oggi).

Trattamento

Conformemente alla normativa i produttori o terzi devono istituire sistemi di trattamento RAEE ricorrendo alle migliori tecniche disponibili. Questi processi

devono comprendere almeno la rimozione di tutti i fluidi e un trattamento selettivo a norma.

Responsabilità dei produttori

I pannelli fotovoltaici giunti a fine vita saranno soggetti a tutti gli obblighi di raccolta e smaltimento già previsti per i rifiuti elettrici ed elettronici, compresa la “REP”, ovvero la Responsabilità Estesa al Produttore. Tale concetto, che sta cominciando a porsi sempre più come riferimento a un numero crescente di leggi in molti Paesi, prevede che il finanziamento delle operazioni legate alla gestione dei rifiuti sia a carico delle industrie stesse. Il decreto considera “Produttori” tutte le società o le persone fisiche che fabbricano e vendono pannelli con il proprio marchio, oppure che li importano dall'estero. La definizione quindi non risulta letterale, ma assume un'accezione più estesa. Questi soggetti si devono rendere responsabili del trasporto e dello smaltimento dei moduli in tutti gli Stati in cui operano. Si tratta di uno dei cambiamenti più significativi del settore fotovoltaico europeo degli ultimi anni. Quando viene installato un impianto non è quindi il titolare che deve preoccuparsi delle spese di smaltimento dei pannelli, perché queste sono già incluse nel prezzo di fornitura e pagate nel momento dell'acquisto dei moduli fotovoltaici.

Le responsabilità previste per produttori e distributori consistono nell'obbligo di comunicare ai registri RAEE i moduli venduti, di organizzare e finanziare lo smaltimento dei rifiuti (individualmente o mediante sistema collettivo riconosciuto) e di informare i clienti finali delle modalità di trattamento delle componenti presenti nei loro prodotti. Inoltre i produttori devono apporre sui propri pannelli fotovoltaici il simbolo di un bidone dei rifiuti barrato, al fine di informare gli utenti che tali moduli devono essere gestiti separatamente dagli altri rifiuti.

L'obbligo di adesione a un Sistema o Consorzio per il recupero dei moduli instaura un rapporto diretto tra la produzione lo smaltimento mediante il processo di responsabilizzazione di produttori e importatori. Attraverso l'acquisto dei componenti fotovoltaici si paga dunque l'adesione del produttore a uno dei consorzi che si occuperanno del loro successivo smaltimento. In riferimento agli impianti entrati in esercizio successivamente alla data 30 giugno 2012, il soggetto è tenuto a trasmettere

al GSE, in aggiunta alla documentazione prevista per gli impianti funzionanti prima della medesima data, la seguente ulteriore documentazione:

- Certificato rilasciato dal produttore, attestante l'adesione dello stesso a un sistema o consorzio europeo;
- Certificato che attesti il possesso da parte dell'azienda delle certificazioni inerenti il Sistema di gestione della qualità, della sicurezza sul lavoro e di gestione ambientale;
- Certificato di ispezione della fabbrica, a verifica della qualità del processo produttivo e dei materiali impiegati.

Il GSE ha rilasciato un apposito Disciplinare Tecnico per la definizione e la verifica dei requisiti tecnici che qualificano i Sistemi collettivi.

Tra le altre novità del decreto emerge anche l'obbligo in capo a chi vende prodotti tecnologici on-line di garantire il ritiro dei RAEE ai propri clienti che acquistano un nuovo prodotto, offrendo loro la possibilità di consegnare l'apparecchiatura a fine vita in punti di raccolta messi a disposizione gratuitamente. Inoltre si segnala una svolta per il consumatore grazie all'introduzione dell'1 contro 0, il quale consente di consegnare gratuitamente i RAEE di piccole dimensioni (inferiori a 25 cm) presso i punti vendita senza alcun obbligo di acquisto.

In conclusione la direttiva sottolinea nuovamente la necessità che la progettazione del prodotto sia orientata al suo fine vita³, in modo da massimizzarne il valore.

Le finalità salienti del nuovo decreto appaiono quindi molteplici:

- Prevenire la produzione di apparecchiature elettriche ed elettroniche;
- Ridurre il volume dei rifiuti da smaltire, promuovendo il riciclaggio e il riutilizzo;
- Assicurare che la gestione dei rifiuti avvenga in modo ecologicamente corretto e sensibilizzare al riguardo i soggetti coinvolti;
- Incoraggiare lo sviluppo di apparecchiature che facilitino la dismissione e il recupero dei RAEE.

³ Per raggiungere tale scopo la progettazione deve proporsi di aumentare l'affidabilità e la durata del prodotto (permettendone ad esempio il riuso), facilitare la sua manutenzione e ricorrere a strumenti, quali l'Ecodesign e il DFD/DFR (Design for Disassembly / Recycling).

2.1.1 Tipologie di rifiuti fotovoltaici

Una prima classificazione dei pannelli fotovoltaici avviene in funzione della potenza nominale dell'impianto di provenienza. In particolare l'art.4 opera una distinzione tra RAEE provenienti da nuclei domestici, originati da pannelli installati in impianti di potenza nominale inferiore a 10 kW, e quelli di tipo professionali, derivati da pannelli di potenza superiore o uguale a 10 kW. I "RAEE domestici" devono essere conferiti a centri di raccolta comunali, mentre i "RAEE professionali" sono da destinarsi a impianti privati o pubblici autorizzati al loro trattamento.

È possibile anche distinguere i RAEE storici, immessi sul mercato prima dell'entrata in vigore della direttiva (12 aprile 2014), rispetto ai RAEE nuovi. Inoltre l'eventuale presenza di sostanze pericolose imporrebbe la loro classificazione a rifiuti pericolosi.

I produttori delle apparecchiature si rendono in ogni caso responsabili della gestione dei RAEE prodotti in proporzione alla quantità immessa sul mercato, istituendo un sistema di raccolta differenziata e di recupero. I soggetti che non adempiranno ai loro obblighi saranno sanzionabili retroattivamente in base al numero di moduli fotovoltaici venduti a partire dall'entrata in vigore della normativa.

Il finanziamento della raccolta e del riciclo dei pannelli fotovoltaici seguirà le regole generali imposte dalla direttiva sui RAEE, a eccezione dei pannelli impiegati in installazioni incentivati con il Conto Energia, constatando che tali tariffe statali venivano concesse solo ad aziende aderenti a un consorzio.

In sintesi la classificazione dei rifiuti provenienti da installazioni fotovoltaiche si presenta secondo le seguenti categorie, per le quali sono indicate i corrispettivi obblighi da verificare:

•RAEE storici, sia domestici che professionali

- La responsabilità dei rifiuti domestici è a carico dei produttori presenti sul mercato nello stesso anno in cui si sono verificati i relativi costi di ritiro, gestione e avvio al recupero, in proporzione alla rispettiva quota di mercato.
- La responsabilità dei rifiuti professionali risulta a carico del produttore nel caso di fornitura di una nuova apparecchiatura di tipo equivalente in sostituzione del precedente prodotto.

- **RAEE nuovi, sia domestici che professionali**

- I costi relativi ai rifiuti domestici sono sostenuti dai produttori presenti sul mercato nell'anno in cui si verificano i rispettivi costi.

- I costi relativi ai rifiuti professionali sono a carico dei produttori in riferimento a tutti i pannelli immessi sul mercato in ogni anno solare.

- **Impianti incentivati dal IV e V Conto Energia**

I proprietari di questi impianti entrati in esercizio a partire dal 01/07/2012 sono esonerati da qualunque impegno, in quanto il consorzio a cui aderisce il produttore se ne fa carico direttamente.

- **Impianti con moduli installati durante il I, II , III Conto Energia**

In questo caso gli impianti risultano entrati in funzione prima del 01/07/2012, e quindi precedentemente alla presa in carico del processo di smaltimento da parte dei consorzi. Il legislatore ha applicato una sorta di “cauzione” per i gestori di tali impianti, consistente in un prelievo che il GSE effettua sugli incentivi del Conto Energia. L'entità precisa della quota è determinata sulla base dei costi medi di recupero e riciclo che i produttori sostengono per aderire ai consorzi.

- **Impianti integrati con caratteristiche innovative e Impianti a concentrazione**

Sebbene entrati in servizio dopo il 01/07/2012 questi tipi di impianti sono esonerati dall'obbligo di adesione a un consorzio. Secondo quanto indicato dal testo del decreto, risultano RAEE a tutti gli effetti e dovrebbero di conseguenza seguire tutte le regole operative dettate. Di loro però non viene fatta esplicita menzione, lasciando un vuoto da colmare.

2.1.2 Implicazioni della direttiva

L'Italia è stato il primo grande mercato ad attuare le modifiche imposte dalla nuova direttiva ed entro il 2019 si deve impegnare a raccogliere l'85% del totale RAEE generato. Questo comporterà un incremento sostanziale dei volumi di raccolta, stimati in 980 mila tonnellate di rifiuti, e un conseguente innalzamento dei costi di sistema, che potrebbero raggiungere i 740 milioni di euro. Gli obiettivi fissati appaiono di grande rilievo, ma celano alcuni punti critici, come gli effetti negativi del canale informale.

Al fine di portare maggiore chiarezza, ReMedia, un Sistema Collettivo per la gestione eco-sostenibile di tutte le tipologie RAEE, ha condotto uno studio sulle implicazioni economiche e operative determinate dalla nuova direttiva europea. La ricerca è stata presentata presso la Camera dei Deputati nel corso dell'evento intitolato "RAEE: minaccia ecologica o miniera urbana?". Partendo dai dati raccolti sul sistema RAEE nel nostro Paese, ReMedia richiede alle Istituzioni un intervento forte a livello normativo per assicurare la tracciabilità dei rifiuti tecnologici e raggiungere in questo modo gli obiettivi prefissati. È stato infatti evidenziato come accanto al Sistema Ufficiale di raccolta operi anche un canale informale, costituito da operatori commerciali che si occupano della gestione dei rifiuti senza risultare in regola con gli standard fissati. Secondo l'analisi svolta da ReMedia i RAEE generati in Italia nel 2011 ammontavano a 14,6 Kg per abitante, ma di questi i sistemi collettivi ne hanno raccolti solamente 4,3 Kg, pari al 37% dei flussi complessivi. Ne risulta quindi che circa 10 Kg per abitante non seguano il percorso ufficiale imposto, generando un grave danno economico ed ambientale che si ripercuote sulla salute dei cittadini. Inoltre non si è certi che i RAEE raccolti dagli operatori esterni al sistema siano trattati da impianti tecnologicamente adeguati e con le corrette procedure di smaltimento. Questi soggetti, non dovendo sostenere i costi per l'adeguamento delle strutture alle norme previste, appaiono economicamente avvantaggiati in una condizione di concorrenza sleale. In conclusione lo studio pone in evidenza il problema generato dai free rider, ovvero i produttori non iscritti al registro nazionale o coloro che dichiarano al Centro di Coordinamento meno di quanto effettivamente immettono sul mercato. Lo scostamento stimato tra l'effettivo immesso sul mercato e il volume ufficiale dichiarato risulta di 300 mila tonnellate. Tale fenomeno causa un aggravio dei costi pari a 15 milioni di euro l'anno per i produttori in regola. Si potrebbe quindi rendere necessaria un'evoluzione dell'attuale modello di raccolta europeo.

Nel corso della preparazione delle modifiche alla direttiva precedente si erano sollevate alcune perplessità da parte degli operatori del settore, i quali avevano individuato alcune criticità nel campo di applicazione della normativa e, soprattutto, nell'indicazione degli obiettivi di raccolta in termini di quantità (peso). Nel dettaglio, per quanto riguarda i target richiesti, essi avevano evidenziato come i pannelli

fotovoltaici non possano essere equiparati ai piccoli elettrodomestici essendo caratterizzati da una vita media più lunga.

Durante l'opera di revisione della direttiva il legislatore comunitario ha dimostrato l'intenzione di dare rilievo al recupero dei numerosi componenti presenti all'interno dei pannelli fotovoltaici, favorendo il loro riutilizzo. Egli ha evidenziato che i criteri essenziali della politica di gestione dovrebbero essere stabiliti a livello comunitario, prevedendo norme minime per il loro trattamento. Viene inoltre messa in risalto la raccolta differenziata quale condizione preliminare per garantire il trattamento specifico dei RAEE. Gli stati membri dovranno in particolare concentrarsi sulle apparecchiature fotovoltaiche, le quali per la loro quantità e per i materiali costituenti potrebbero in futuro provocare ingenti danni all'ambiente. Il legislatore europeo ha infine puntualizzato che la definizione degli obiettivi di raccolta dovrebbe fare riferimento ai volumi di rifiuti prodotti, tenendo allo stesso tempo in debita considerazione i differenti cicli di vita.

2.2 Revisione RoHS

Il Consiglio europeo il 23 maggio 2011 ha approvato le modifiche alla direttiva 2002/95/CE (chiamata comunemente RoHS dall'inglese "*Restriction of Hazardous Substances*"), la quale poneva dei vincoli nell'uso di sei sostanze pericolose nella produzione di diverse categorie di apparecchiature elettriche ed elettroniche: piombo, mercurio, cadmio, cromo esavalente, ritardanti di fiamma bifenili polibromurati (PBB) ed etere di bifenile polibromurato (PBDE). La legge disponeva che tali sostanze venissero sostituite da alternative maggiormente sicure.

La nuova normativa si presenta sotto forma di revisione della precedente ed estende il divieto di metalli pesanti e altre sostanze pericolose a un numero ancora più elevato di prodotti. Con questa nuova regolamentazione si intende migliorare ulteriormente i livelli di sicurezza di apparecchiature elettroniche, come termostati, dispositivi medici e quadri comandi, oltre a impedire il rilascio di sostanze dannose nell'ambiente. Le categorie di prodotti contemplate comprendono ora anche tutte le apparecchiature elettroniche ed elettriche, così come i cavi e i pezzi di ricambio. In ogni caso sarà

possibile la concessione di deroghe nelle situazioni in cui non risultano disponibili alternative soddisfacenti.

Dopo varie discussioni si è deciso di escludere i pannelli fotovoltaici dal campo di applicazione della direttiva, perché contribuiscono al raggiungimento degli obiettivi comunitari fissati in materia di energie rinnovabili. Gli impianti sono quindi destinati a essere utilizzati in un sistema concepito, montato e installato da professionisti per un impiego permanente in un luogo prestabilito, sfruttando la produzione di energia elettrica da luce solare per applicazioni pubbliche, commerciali, industriali e residenziali. Nel caso non si fosse scelto di applicare tale disposizione sui pannelli fotovoltaici si sarebbe determinato un impatto sulla promozione dell'uso di energia proveniente da fonti rinnovabili.

2.2.1 Discussioni sui pannelli di tellururo di cadmio

Data la sua documentata tossicità, il cadmio è stato inserito nella lista dei materiali vietati per le produzioni elettriche ed elettroniche. I pannelli fotovoltaici contenenti tellururo di cadmio rischiavano quindi di finire al bando. Tale elemento risulta più economico del silicio, ma richiede un'attenzione particolare per il suo smaltimento al termine del ciclo di vita dei prodotti che lo contemplano. Il suo impiego è rintracciabile in modo rilevante all'interno dei pannelli solari fabbricati dal colosso fotovoltaico First Solar.

In seguito all'approvazione del testo contenuto nella nuova direttiva RoHS a maggio 2011 il Consiglio europeo ha confermato che non sussiste alcun divieto di installazione di questa tipologia di pannelli, allo scopo di favorire il rispetto dei target prefissati in termini di energie rinnovabili ed efficienza energetica.

2.3 Conto Energia

“Conto Energia” è il nome comune assunto dal programma europeo di incentivazione della produzione di elettricità da fonte solare mediante impianti fotovoltaici connessi alla rete (grid connected). L'incentivo consiste in un contributo finanziario per kWh di energia prodotta per un certo periodo di tempo, variabile a seconda delle dimensioni o

tipologia di impianto. La disposizione di tali tariffe agevolanti aveva come scopo quello di stimolare l'installazione di impianti con il vantaggio di garantire, assieme alla parallela copertura dei propri consumi e alla vendita di eventuali surplus energetici, un minor tempo di recupero dei costi d'impianto o del capitale iniziale di investimento e, quindi, un successivo maggiore guadagno. In Italia dal 2005 al 2013 si contano cinque diversi programmi di incentivazione, ciascuno in superamento o adeguamento del precedente. Il V Conto Energia è terminato il 6 luglio 2013 senza l'emanazione di un nuovo piano di incentivi.

Il Conto Energia è in sostanza un decreto che stabilisce per almeno venti anni a privati, imprese o enti pubblici un incentivo proporzionale all'energia elettrica prodotta e tende a privilegiare l'applicazione di piccoli impianti che autoconsumano l'energia generata. Per poter accedere agli incentivi previsti occorre soddisfare le condizioni fissate. Ad esempio è il IV Conto Energia che prevede l'obbligo di adesione a un consorzio per i produttori e richiede, inoltre, di fornire ai clienti garanzie sul riciclo dei pannelli. Da luglio 2012 si era quindi reso necessario trasmettere al GSE un attestato di adesione per poter accedere alle tariffe agevolanti.

2.3.1 Come funzionano gli incentivi

Esistono principalmente due tipologie di incentivi destinati al fotovoltaico:

- Incentivi a fondo perduto per l'installazione di un impianto;
- Incentivi per la vendita dell'energia prodotta.

1) Incentivi di installazione

Come è già stato illustrato, lo stato italiano ha introdotto un sistema di incentivi del fotovoltaico che prende il nome di Conto Energia. Il GSE retribuisce con un incentivo (espresso in centesimi di euro) ogni kWh generata dall'impianto fotovoltaico. Tale quota varia a seconda della potenza installata, dalla data in cui l'impianto è stato "allacciato" alla rete e dalla sua tipologia. Gli incentivi sono pagati secondo scadenze mensili o bimestrali. Il sistema incentivante ha subito nel corso degli anni la seguente evoluzione:

- Primo Conto Energia – incentivi del 2005-2007;
- Secondo Conto Energia – incentivi del 2007-2010;

- Terzo Conto Energia – incentivi del 2010-2011;
- Quarto Conto Energia – incentivi del 2011-2012;
- Quinto Conto Energia – incentivi del 2012-2013;
- Termine incentivi statali – 6 luglio 2013.

Dopo sei anni di incentivazioni i risultati parlano di 531.242 impianti installati e una produzione energetica di 18.862 GWh nel 2012, corrispondente al 5,5% del consumo elettrico italiano.

2) Incentivi per la vendita di energia

Per quanto riguarda la vendita dell'energia prodotta tramite gli impianti fotovoltaici esistono due tipi di contratto:

- Scambio sul posto – meccanismo che consente di immettere in rete l'energia elettrica generata e non immediatamente consumata, per poi prelevarla in un momento successivo per soddisfare i propri fabbisogni.
- Cessione in rete (o ritiro dedicato) – configurazione che permette di vendere l'energia dell'impianto prodotta in surplus rispetto all'autoconsumo.

2.3.2 Fine degli incentivi

Giunti al termine dell'ultima versione del Conto Energia, per quel che riguarda gli impianti domestici e quelli al servizio di abitazioni si aprono nuove opportunità alternative ai fondi di incentivazione, come la detrazione fiscale. Per impianti realizzati entro il 31 dicembre 2013 la quota detraibile risultava pari al 50% dei costi sostenuti, mentre da gennaio 2014 la detrazione IRPEF è scesa al 36%. Le spese destinate alla realizzazione dell'impianto saranno recuperabili in dieci anni attraverso la dichiarazione dei redditi. La detrazione IRPEF è abbinabile solo con il meccanismo dello "scambio sul posto", il quale consente un notevole risparmio sulla propria bolletta elettrica. In questa configurazione l'impianto fotovoltaico lavora a regime di interscambio con la rete locale, immettendo sul sistema di distribuzione solo quello che non viene consumato istantaneamente.

Il GSE, attraverso un comunicato stampa, ha dichiarato che il termine degli incentivi è avvenuto in seguito al raggiungimento della soglia prefissata di costi cumulati annui per importi pari a 6,7 miliardi di euro. Gli impianti fotovoltaici non possono più beneficiare dei contributi in denaro a partire da 6 luglio 2013, ma sono tuttora previste agevolazioni legate al IV Conto Energia, nei casi previsti dal GSE, per quanto riguarda detrazioni fiscali legate alla ristrutturazione edilizia e i piccoli impianti residenziali. Gli interventi ammessi per la richiesta di tariffe incentivanti comprendono quelli di nuova costruzione, rifacimento totale o potenziamento degli impianti. In una prospettiva generale però si è entrati in uno scenario di fruizione dell'energia solare senza il riconoscimento di alcun incentivo. I nuovi impianti industriali e commerciali potranno fare affidamento unicamente alle favorevoli dinamiche del prezzo (di realizzazione dell'impianto e di cessione alla rete elettrica).

Gli incentivi hanno comunque avuto il merito di aver avviato il settore del fotovoltaico, inserendo in breve tempo l'Italia tra i primi posti al mondo in termini di installato e mercato fotovoltaico. Da questo momento in poi la sopravvivenza del settore fotovoltaico dipende dal raggiungimento della grid-parity, ovvero della condizione in cui l'energia elettrica prodotta da fonti alternative presenti lo stesso prezzo dell'energia tradizionale ricavata da fonti fossili.

2.3.3 Caso fotovoltaico in Sicilia

Con la fine del Conto Energia è iniziata una nuova era del fotovoltaico. Un discreto numero di impianti residenziali durante l'anno 2013 è stato realizzato grazie alle detrazioni fiscali e sono state avviate le prime installazioni destinate all'autoconsumo. Inoltre sono in corso di autorizzazione alcuni grandi parchi fotovoltaici che si confronteranno con le convenzionali fonti di energia nel campo della vendita. I primi dati positivi del fotovoltaico italiano post-incentivi giungono dalla Sicilia, regione in cui l'energia solare è favorita dall'elevata radiazione. All'interno del Report 2014 del Polo Fotovoltaico della Sicilia si legge che la potenza installata sull'isola ha superato i 1.208 MW distribuiti su 37.783 impianti, mentre un anno fa raggiungeva appena i 1137 MW. Si può quindi desumere che il fotovoltaico siciliano non si è arrestato, andando invece incontro a un incremento della potenza del 6%. Spiega Mario Pagliaro, uno dei curatori del report, che gran parte dei 3.000 impianti nuovi registrati dal GSE

risultano tutti incentivati dall'ultimo Conto Energia e almeno 2.000 sono stati realizzati in autoconsumo mediante le detrazioni fiscali. Il ricercatore prosegue evidenziando come le imprese sul mercato hanno rimodulato l'offerta, trasferendo ai clienti il crollo dei prezzi relativi ai pannelli, mentre è apparso quasi sistematico il ricorso a inverter a batteria. Questo andamento dimostra come la generazione distribuita in Sicilia stia diventando realtà. La regione si sta inoltre incamminando verso l'autoconsumo in grid-parity, ovvero senza ricorrere ad alcun incentivo. A livello teorico risulta infatti conveniente questa configurazione rispetto all'acquisto di tutta l'elettricità dalla rete. La visione di Pagliaro risulta ottimistica, affermando:

“La crescita del costo del kWh è stata così rapida che la sola quota di energia risparmiata con l'autoconsumo giustifica la scelta di intraprendere l'investimento. Le barriere che finora avevano limitato questo tipo di installazioni sono tutte cadute. I gestori di supermercati, ospedali, alberghi, scuole e impianti sportivi stanno realizzando installazioni di impianti fotovoltaici low-cost del 2014. In questo modo il fotovoltaico cresce con la forza intrinseca dei propri straordinari vantaggi”

Altro terreno in fase di esplorazione è quello offerto dai grandi impianti grid-parity, concepiti per la vendita diretta all'ingrosso di tutta l'energia prodotta. La Sicilia può infatti contare, oltre a una favorevole radiazione solare, a un mercato elettrico zonale con prezzi tra i più alti rispetto la media nazionale. Rappresenta quindi un'opportunità di business a cui non possono rinunciare. Le prospettive risultano buone, ma potrebbero essere rallentate da un prossimo abbassamento del prezzo sul mercato.

2.3.4 Recupero di investimento

Il rientro della metà del costo di impianto arriva dopo circa dieci anni per merito delle detrazioni fiscali, mentre per la restante spesa occorre basarsi sul mancato esborso realizzato grazie all'autoconsumo e al contributo offerto dal sistema dello Scambio sul posto. Il ritorno economico si aggira quindi attorno ai dodici anni considerando un autoconsumo inferiore al 40%. Per il recupero dell'investimento occorrerà quindi fare affidamento a:

- Prezzi delle installazioni di impianti;
- Meccanismo dello scambio sul posto o, in alternativa, del ritiro dedicato;

- Detrazioni fiscali per impianti domestici (o comunque fino a 20 kW di potenza);
- Adeguati sistemi di ottimizzazione e accumulo, mediante batterie di energia autoprodotta.

2.3.5 Occupazione di territori agricoli

In Italia gli impianti fotovoltaici hanno riscontrato un enorme impennata nelle installazioni dal momento in cui è stata resa nota l'imminente riduzione delle tariffe incentivanti previste dal Conto Energia. Tale annuncio ha dato avvio a una vera e propria corsa all'installazione, il cui intento consisteva nel far entrare l'impianto in esercizio entro il termine indicato dal GSE. Sul territorio nazionale si è arrivati a ottenere una superficie di 33,2 milioni di m² impegnata da sistemi fotovoltaici collocati a terra, pari a una potenza di 1.465,5 MW. I territori che detengono il maggior valore di superficie occupata da pannelli a terra risultano:

- Puglia con 14,8 milioni di impianti;
- Lazio con 3,8 milioni di impianti;
- Emilia Romagna con 3,4 milioni di impianti.

Tale fenomeno ha sollevato numerose criticità in quanto, seppur si è favorevoli all'approvvigionamento energetico da fonti rinnovabili e all'installazione di sistemi che permettano la riduzione dell'impiego di risorse esauribili, non risulta accettabile l'idea di sfruttare terreni agricoli per le installazioni fotovoltaiche. Molte di queste aree sono considerate infatti ideali e necessarie alla coltivazione. Questo comportamento è stato reputato un passo indietro rispetto il proposito di una gestione ecosostenibile, in quanto limiterebbe zone fruibili per la produzione di prodotti alimentari naturali. Questo *boom* di installazioni ha provocato quindi un'eccessiva sottrazione di aree a vocazione agricola, determinando un impatto negativo in termini di tutela del paesaggio e assetto territoriale.

Per scongiurare questo accaparramento dei terreni è stato predisposto il 24 gennaio 2012 un decreto sulle liberalizzazioni, il quale prevede il blocco degli incentivi per tutte le tipologie di impianti installati su aree agricole, introducendo anche nuovi criteri di ottenimento delle incentivazioni. Queste nuove disposizioni limitano i

progetti di installazione dei sistemi fotovoltaici con moduli ubicati a terra da parte di aziende e anche di proprietari terrieri, che avevano intravisto nel fotovoltaico la possibilità di produzione di un'energia commerciabile. Sono esclusi da questo divieto alcune tipologie di sistema:

- Impianti realizzati o che devono ancora essere realizzati su terreni demaniali militari;
- Impianti da insidiare su aree agricole con titolo abilitativo entro la data di entrata in vigore della legge (25 marzo 2012). Per queste installazioni sono stati introdotti alcuni requisiti dimensionali e costruttivi, per cui i nuovi sistemi devono essere caratterizzati da una potenza nominale non superiore a 1 MW e non possono occupare più del 10% dell'area agricola.

Si conferma quindi la volontà del legislatore di non concedere tariffe agevolanti a questi tipi di progetti. Occorre sottolineare che si tratta di un divieto di accesso all'incentivo, ma non alla possibilità stessa di realizzazione.

Queste tipologie di installazioni su terreni agricoli sono state interdette da molte delibere regionali e Piani Regolatori Comunali. Nel periodo delle incentivazioni appariva infatti molto redditizio realizzare centrali fotovoltaiche rispetto alla coltivazione, soprattutto nel sud Italia, dove i terreni incolti abbondano. Nonostante gli incentivi siano terminati, la diafrasi tra divieti e permessi costituisce tuttora una questione controversa e non sufficientemente regolata. Spesso infatti sussiste un "conflitto normativo" tra i piani regolatori comunali (trascritti per salvaguardare l'ambiente), le leggi regionali e i decreti nazionali, i quali a loro volta sottostanno a specifiche direttive europee.

Un famoso caso su questa tematica ha coinvolto il Comune di Canaro in Veneto, dove una società aveva espresso l'intenzione di realizzare un impianto fotovoltaico caratterizzato da 48 MW di potenza su terreno agricolo. Al riguardo la Regione Veneto aveva fatto ricorso, a supporto della legge regionale la quale pone il veto all'autorizzazione. La sentenza infine concesse la deroga alla costruzione su zona agricola di tale impianto. Infatti il Consiglio di Stato, nonostante avesse ritenuto l'installazione in contrasto con la legge regionale e il piano regolatore, aveva sottolineato che la delibera costituiva l'attuazione della direttiva 2001/77/CE imposta

dall'Unione Europea. Questa norma statale infatti ammette la collocazione di impianti di produzione energetica da fonti rinnovabili in zona urbanistica-agricola ed essa è venuta quindi a prevalere sulle misure regionali.

2.4 Decreto competitività

Il 7 agosto 2014 è stato approvato il decreto competitività dal Senato, diventando così legge. Tale decreto, ora convertito, contiene le norme previste dal “pacchetto taglia-bollette”, comprensivo dello Splamaincentivi, e la norma che impone di pagare parte degli oneri di sistema sull'elettricità autoconsumata.

Diverse sono le novità che il testo prevede per le energie rinnovabili in generale. Il maggior cambiamento riguarda gli impianti con potenza inferiore a 20 kW, i quali non dovranno più pagare gli oneri previsti dal sistema sull'energia autoconsumata. Per essi il decreto stabilisce che l'esenzione dal pagamento sia ridotta in maniera molto contenuta, graduale e non retroattiva, dando un orizzonte di stabilità ai futuri sistemi SEU (Sistemi efficienti di Utenza). Grazie all'eliminazione di tali oneri si costruisce quindi un vantaggio concreto per i piccoli impianti fotovoltaici, ovvero quelli installati dalle famiglie sulla propria abitazione.

Per gli impianti non interessati a tale esenzione è invece previsto:

- Una maggioranza del 5% degli oneri che avverrà entro il 30 settembre 2015, a cui potranno seguire ulteriori aggiornamenti con cadenza biennale;
- Gli aggiornamenti successivi al primo non potranno essere retroattivi, ma applicabili solamente agli impianti che entrano in funzione dopo il 10 gennaio dell'anno successivo a quello dell'entrata in vigore dell'aumento;
- Gli aumenti seguenti con cadenza biennale non potranno subire un incremento superiore al 2,5%.

Si impongono quindi dei limiti agli aumenti futuri della quota da pagare. Questi aumenti costituivano gli aspetti più criticabili della misura dato che creavano grande incertezza per i progetti ancora da realizzare, con il conseguente rischio di frenare la diffusione del fotovoltaico non incentivato.

Sono state inoltre apportate novità positive per il fotovoltaico, come l'estensione della soglia di applicazione dello scambio sul posto fino a 500 kW di potenza, mentre prima la soglia era fissata a 200 kW. Tale meccanismo può essere effettuato quando produttore e consumatore coincidono oppure quando il consumatore gestisce non solo l'acquisto, ma anche la vendita in rete delle eccedenze.

Appare infine chiarito il ruolo del titolare del punto di connessione, che deve essere il consumatore di energia, e anche del regolamento di esercizio, il quale deve essere sottoscritto da produttore e consumatore.

Una delle questioni che ha sollevato maggiori polemiche proviene dal decreto "Spalmaincentivi", il quale è stato ridisegnato per impianti di medie e grandi dimensioni. Tale riscrittura non sembra infatti aver sanato gli aspetti più critici di questa norma controversa. Il provvedimento infatti propone una dilazione dei tempi di restituzione dell'incentivo o una riduzione dell'importo incentivato, andando così a penalizzare gli investimenti già effettuati. Si tratta di una delle misure avviate dal Governo con lo scopo di ridurre le bollette alle PMI (Piccole e Medie Imprese). Esso non ha mai incontrato il favore delle aziende appartenenti alla filiera delle rinnovabili, le quali lo ritengono addirittura incostituzionale in materia di retroattività e tutela dell'affidamento. Secondo il decreto, gli imprenditori impegnati nel settore solare con impianti di potenza non inferiore a 200 kW avranno la facoltà di scegliere o un ampliamento da 20 a 24 anni dei rimborsi relativi agli incentivi, combinato con un taglio complessivo del 20%, oppure, in alternativa, un taglio secco del 10% sulla ordinaria scansione ventennale. Le PMI saranno quindi agevolate con un taglio delle bollette energetiche, ma per poter adottare questa misura si è reso necessario coprire i costi con la rimodulazione degli incentivi già riconosciuti agli impianti. Il GSE eroga le tariffe per impianti in funzione con rate mensili costanti, in misura pari al 90% della producibilità media annua stimata di ciascuno, ed effettua il conguaglio entro il 30 giugno dell'anno successivo.

Il 30 novembre 2014 coincideva con la data di scadenza prevista per la comunicazione dell'opzione che si intendeva esercitare tra le tre alternative proposte per gli impianti fotovoltaici, sintetizzate qui di seguito:

- Tariffa erogata in 24 anni, invece di venti, e ridotta in misura inversamente proporzionale alla durata del periodo residuo;
- Tariffa erogata in 20 anni e rimodulata con un incentivo ridotto per il primo periodo, poi incrementato in egual misura per il secondo periodo;
- Tariffa erogata in 20 anni e ridotta per il periodo residuo di incentivazione di una percentuale pari al 6% per impianti compresi tra 200 e 500 kW di potenza, del 7% per impianti tra 500 e 900 kW o dell'8% per impianti oltre i 900kW.

Agli operatori era richiesto di specificare la propria scelta, in caso contrario veniva automaticamente applicata la terza opzione.

Tali cambiamenti entreranno in vigore a decorrere dal primo gennaio 2015.

2.5 Misure antidumping

Finora l'EPIA aveva assunto un atteggiamento neutrale in merito alle misure protezionistiche messe in atto da USA e UE contro il fotovoltaico *made in China*, ma ultimamente si è apertamente schierata contro dazi e qualsiasi tipo di barriera. Ha preso quindi la decisione di sostenere il libero commercio di prodotti solari e, di conseguenza, auspica a una rapida conclusione dell'accordo sulla liberalizzazione dei beni e dei servizi verdi. Si stimolerebbe in questo modo la crescita dell'industria fotovoltaica in tutto il mondo, poiché consentirebbe la riduzione del prezzo dei beni, aumentando la domanda e stimolando in questo modo le opportunità di business. EPIA appare favorevole anche agli accordi bilaterali, come quello siglato da UE e Cina, poiché ritenuti il modo più efficace per favorire il libero commercio. Tali risoluzioni risultano quindi molto più efficienti rispetto l'introduzione di dazi punitivi, i quali possono provocare la contrazione del mercato solare.

2.6 Delibera Sistemi di accumulo

Un nuovo passo avanti per il mercato delle rinnovabili in Italia è rappresentato dalla delibera sui sistemi di accumulo, che comprende le regole di connessione alla rete pubblica, di trasmissione dell'energia e dei costi connessi, offrendo finalmente

certezze regolamentari agli operatori della filiera. Il regolamento definisce i termini di accesso alla rete, prelievo di energia e il suo rilascio riferito agli ambiti residenziali, commerciali e industriali. Sono inoltre riportati al suo interno i campi di applicazione dei sistemi di accumulo, sia in abbinamento ad impianti di produzione energetica che in assetto isolato. Secondo la definizione riportata nel provvedimento, con sistema di accumulo si intende un insieme di dispositivi atti ad assorbire e rilasciare energia elettrica in modo che funzioni in maniera continuativa e in parallelo con la rete. Nel dettaglio:

- A seconda delle modalità di installazione il sistema può essere considerato come un singolo impianto di produzione o uno dei diversi gruppi di generazione che vanno a costituire un impianto di produzione;
- Per quanto riguarda l'utilizzo della rete pubblica i sistemi sono trattati come singoli impianti di produzione programmabile;
- Sul fronte prezzi si applicano corrispettivi correlati ai costi effettivi e proporzionali alla potenza per le connessioni in alta e altissima tensione.

Grande soddisfazione è stata espressa da ANIE (Federazione rappresentate delle industrie elettriche ed elettroniche) in seguito alla pubblicazione della delibera. Grazie a essa infatti si hanno a disposizione basi operative stabili alla quale tutti gli operatori devono fare riferimento per implementare soluzioni *Energy Storage*, atte a rendere il sistema elettrico italiano più flessibile e in grado di integrare nella rete in maniera più efficace ed efficiente gli oltre 26 GWp di potenza rinnovabile non programmabile esistenti. Tale percorso di normazione appare però solamente agli inizi. Si attendono ancora alcune varianti abbinata alla delibera sugli accumuli e le regole tecniche definitive del GSE previste per il 31 marzo 2015.

Con l'approvazione delle delibere si è deciso inoltre di introdurre l'obbligo anche per gli impianti SEU di potenza superiore a 20 kW di pagare il 5% degli oneri di sistema sull'energia consumata ma non prelevata dalla rete. Teoricamente per applicare tale disposizione occorrerebbe misurare esattamente quanta energia produce ogni impianto che funziona in autoconsumo. Questa opzione appare chiaramente impraticabile. Si è risolto quindi il problema attraverso due delibere: la prima introduce un sistema di

pagamenti basato sulla tipologia di allacciamento, taglia dell'impianto e fonte, mentre la seconda calcola i quantitativi da pagare entro il 2015.

Riassumendo:

- Per i punti di prelievo in bassa tensione si pagherà la somma di 36 €/anno;
- Per quelli in media tensione la cifra dipende dalla taglia e dalla fonte che alimenta l'impianto. Il corrispettivo sarà calcolato mediante la seguente formula:

$$\text{Maggioranza A3} = \text{Potenza} \times h \times \alpha \times \text{Aliquota}$$

dove:

h è il numero di ore di riferimento differenziato per fonte;

α è un parametro che tiene conto dell'incidenza dell'autoconsumo in sito sulla produzione totale di energia (convenzionalmente posto pari a 0,5);

Aliquota corrisponde al 5% del valore unitario delle componenti.

Secondo questa formula un'installazione in regime SEU dotato di un impianto fotovoltaico da 200 kW collegato in media tensione pagherà indicativamente 273 €/anno. Un SEU con cogenerazione a gas della stessa taglia invece pagherà sette volte tanto.

- Per i punti in alta e altissima tensione (anche per imprese a forte consumo di energia) sarà applicato a conguaglio un sistema di maggiorazioni calcolate a livello di singola impresa, in base ai dati di consumo rilevabili dalle dichiarazioni rese.

Attraverso la pubblicazione delle delibere, oltre alle disposizioni relative all'integrazione dei sistemi di accumulo di energia nel sistema elettrico nazionale, sono definite ulteriori misure eventuali, necessarie alla corretta erogazione di strumenti incentivanti o di regimi commerciali speciali.

I sistemi di accumulo fungono da tecnologie abilitanti per lo sviluppo delle installazioni fotovoltaiche in regime SEU. I Sistemi Efficienti di Utenza rappresentano uno strumento molto interessante per favorire il fotovoltaico senza incentivi e le delibere in merito permettono di mettere in pratica tali modelli di business.

In conclusione, il quadro normativo per quanto riguarda il settore fotovoltaico appare finalmente stabile. Le regolamentazioni sull'autoconsumo e il SEU rappresentano

ottimi presupposti per la crescita degli impianti di media taglia, mentre in ambito residenziale dovrebbero sopravvivere grazie alla conferma delle detrazioni fiscali.

Da tempo il settore industriale attendeva un segnale di considerazione dal mondo istituzionale affinché l'Italia si potesse dimostrare competitiva nel tema dello stoccaggio di energia. Nell'ultimo triennio le industrie nazionali hanno acquisito un ruolo di *front runner* nel panorama mondiale del settore, grazie a notevoli investimenti effettuati nella ricerca e nello sviluppo tecnico-commerciale. Per merito delle nuove disposizioni governative ci si sta quindi avviando verso un mercato all'avanguardia nel nostro Paese e dal 2015 sarà possibile rilanciare la generazione distribuita in autoproduzione in ambiti residenziali, commerciali e industriali.

3. Conferenze e convegni annuali

È dal 2010 che una conferenza Europea annuale riunisce insieme produttori, esperti di riciclaggio e ricercatori per rivolgere lo sguardo al futuro dei moduli fotovoltaici. Tale evento, alla sua terza edizione, ha avuto luogo nel 2013 a Roma, in riconoscimento del rapido sviluppo di quello che oggi si presenta come uno dei più importanti mercati fotovoltaici in Europa secondo l'opinione espressa da PV Cycle.

Negli ultimi anni la conferenza ha attirato centinaia di partecipanti provenienti dal settore fotovoltaico e del riciclaggio, offrendo importanti opportunità di scambio di idee a produttori, istituti di ricerca e impianti di riciclaggio. Riguardo alla direttiva RAEE da poco formulata si è discusso degli eventuali impatti che i nuovi requisiti determineranno sul trattamento dei pannelli fotovoltaici. Questi eventi rappresentano quindi delle importanti opportunità di discussione fra esperti del settore riguardo i più recenti sviluppi nel riciclaggio dei pannelli solari.

Anche da parte di Ambiente Italia l'interesse del settore fotovoltaico si è spostato dalla gestione degli impianti a quella dei rifiuti che essi genereranno a fine vita. Nel 2014 ha coordinato la quarta edizione del Convegno Nazionale "Recupero e riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita: la responsabilità estesa dei produttori" con la collaborazione

del Centro Studi Solarexpo, GSE e Legambiente. L'incontro si è tenuto nel corso di Solarexpo The Innovation Cloud 2014, mostra internazionale che verte la propria attenzione sulle energie rinnovabili e la sostenibilità energetica. Essa ha rappresentato un'occasione pubblica per aggiornare gli operatori del mercato sulle modalità di recepimento della direttiva che assoggetta i pannelli solari alla disciplina dei rifiuti RAEE. I principali elementi di dibattito hanno riguardato l'implementazione del Disciplinare Tecnico GSE e gli sviluppi delle tecnologie di trattamento dei rifiuti provenienti dalla dismissione degli impianti solari. Il nuovo decreto è stato quindi introdotto e illustrato da importanti interventi istituzionali nel corso del Convegno.

All'interno dei propri stand e dei padiglioni, Cobat ha presentato un'originale campagna "Call for entry" volta a sensibilizzare tutti i visitatori verso un corretto recupero dei moduli giunti a fine vita. Nel corso della manifestazione è stato anche dedicato molto spazio al dibattito tecnico e scientifico sui temi di interesse, quali le dinamiche di innovazioni delle rinnovabili, il concetto di accumulo e la nuova generazione di inverter.

Questi eventi pubblici costituiscono quindi importanti piattaforme di raccolta di esperti appartenenti al settore e provenienti da tutto il mondo, i quali possono liberamente presentare le proprie proposte e/o opinioni riguardo ai più recenti sviluppi che hanno interessato il riciclaggio fotovoltaico. Inoltre rappresentano importanti occasioni di discussione e chiarimenti riguardo alle modalità corrette di recepimento delle normative emanate dai governi, in modo che i produttori possano regolamentarsi adeguatamente.

CAPITOLO III - VERSO UNA GESTIONE SOSTENIBILE DEI PANNELLI FOTOVOLTAICI

Analisi LCA, convenienza e fattibilità del fotovoltaico

1. Sviluppo di tipo sostenibile

Come è già stato menzionato nel capitolo precedente, il Rapporto Brundtland rappresenta il primo documento mondiale in cui viene esposto lo stato attuale del nostro Pianeta e la conseguente necessità di promuovere un nuovo modello di crescita basato sullo sviluppo sostenibile. Con quest'ultimo concetto si intende una forma di sviluppo che soddisfa le esigenze del presente senza compromettere la possibilità delle future generazioni di soddisfare le proprie. Due risultano i principali obiettivi di sostenibilità:

- Garantire un accesso continuo e duraturo alle risorse naturali;
- Evitare danni permanenti all'ambiente attuale (ed eventuali ripercussioni future).

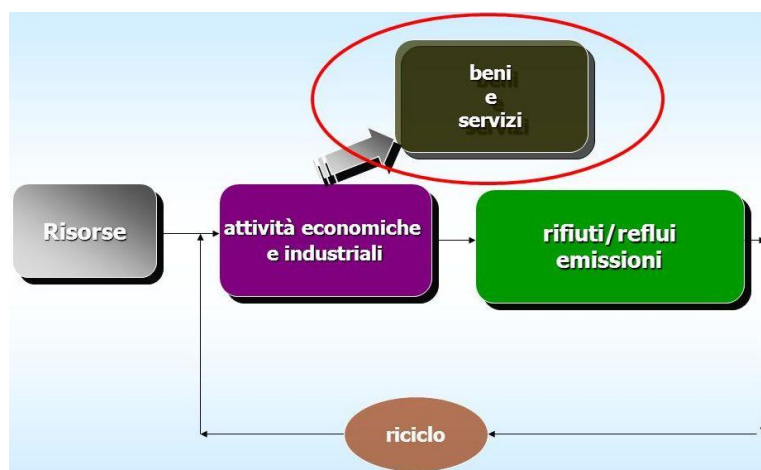
Nel rispetto della sostenibilità sono indicati due principi base a cui occorre fare riferimento in ambito ambientale, economico, sociale e istituzionale. I principi riportati corrispondono ai seguenti:

- La velocità di prelievo deve essere pari (o al massimo uguale) alla velocità di rigenerazione della risorsa;
- La velocità di produzione dei rifiuti deve coincidere con le capacità naturali di assorbimento da parte degli ecosistemi in cui vengono immessi.

Da questi due pensieri deriva la consapevolezza del bisogno di adottare un approccio differente nei confronti delle risorse naturali a nostra disposizione, al fine di evitare il loro depauperamento o un inquinamento irreversibile. Si rende quindi necessario da

parte dell'uomo un uso sostenibile della materie prime nell'esecuzione delle attività antropiche, sfruttando ad esempio risorse rinnovabili (che si rigenerano da se stessi) oppure ricercando la minima produzione di rifiuti e valorizzando allo stesso tempo il tema del riciclaggio.

Le operazioni di riciclo costituiscono dei processi di trattamento, effettuati sui rifiuti, che permettono di trasformarli e rimetterli in input alle attività sotto forma di materie prime-seconde⁴. Si garantiscono in questo modo numerosi vantaggi, tra cui il minor consumo di materie prime, l'ottimizzazione energetica e l'eliminazione del rischio di inquinamento ambientale. Seguendo questa modalità di esecuzione si ottiene un sistema in cui tutti i componenti si inseriscono all'interno di un ciclo chiuso. Questo modello permette di essere autosufficienti e incoraggia le aziende a divenire più responsabili e innovative, ricercando sia l'eccellenza economica che ambientale.



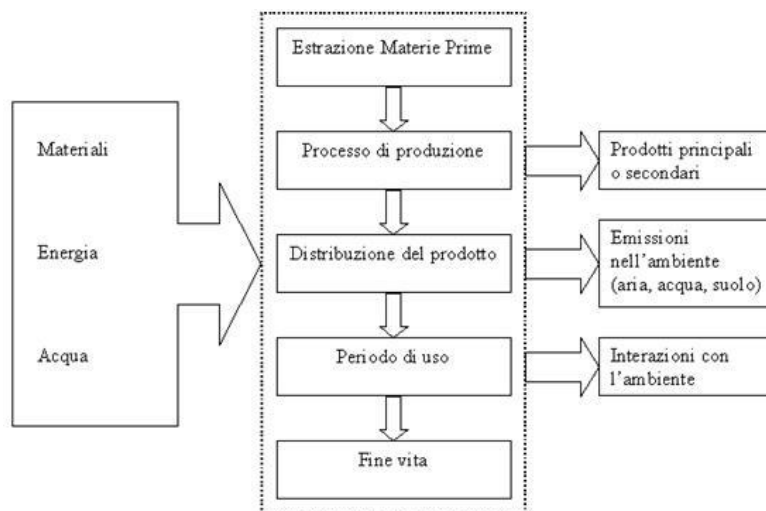
Schema illustrante il ciclo chiuso delle attività aziendali

Il concetto di sviluppo sostenibile ha quindi coinvolto l'interesse di tutte le istituzioni internazionali dal punto di vista normativo, ma anche quello dell'aziende manifatturiere, le quali hanno orientato la loro produzione alla progettazione di beni ispirati ai principi di eco-efficienza e "dematerializzazione". Secondo questi due concetti le imprese realizzano progetti volti ad allungare il ciclo di vita dei prodotti, riducendo a monte il consumo di materie prime e limitando a valle la generazione di rifiuti. Si cerca quindi di rendere i beni più durevoli e affidabili attraverso l'ottimizzazione dei processi di trasformazione.

⁴ Si vuole far osservare che la distinzione che intercorre tra risorse primarie e secondarie si basa sul materiale originario e non sulla qualità. Con materie prime si indicano le risorse di origine naturale (provenienti dall'ambiente), mentre con materie seconde (o prime-seconde) si fa riferimento ai materiali originati dai rifiuti in seguito a un adeguato processo di trattamento.

1.1 Analisi LCA

La progettazione di un prodotto risulta sempre più orientata al suo fine vita, rendendo i corrispettivi rifiuti generati più pratici a processi di trattamento e strategie di riutilizzo. In questo senso una metodologia che mi permette di attuare una valutazione completa dell'impatto ambientale prodotto da un bene è fornita dall'LCA (Life Cycle Assessment), la quale non analizza solamente gli effetti e le eventuali immissioni nell'ambiente derivanti dal suo utilizzo, ma anche quelli provocati dalla sua produzione, dal suo mantenimento e dal relativo smaltimento del rifiuto prodotto. Sono inclusi all'interno delle analisi tipologie di impatto che normalmente non vengono tenuti in considerazione nella maggior parte degli studi tradizioni. Identifica quindi i flussi prelevati e immessi nell'ambiente (consumi energetici, rifiuti) che ciascuna fase del suo ciclo di vita determina.



Sostanze prelevate e immesse nell'ambiente in ogni fase di vita del prodotto

Le conclusioni di questo studio mi permettono di identificare gli stadi di maggiore impatto dal punto di vista ambientale e di individuare le criticità in cui risulta necessario applicare miglioramenti al prodotto, supportando quindi la sua progettazione.

Per la realizzazione di questa analisi si impiega un processo iterativo, che conta di quattro fasi:

- 1 **Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione**, in cui si individuano i destinatari dello studio e le applicazioni previste. Nel dettaglio si stabilisce a quali

- necessità si intende rispondere (ad esempio se si desidera attuare un potenziamento del prodotto o svilupparne uno nuovo);
- 2 **Analisi dell'inventario**, che prevede l'identificazione dei flussi in entrata e uscita dalle unità di processo di cui si compone il sistema. In questa fase complessa è possibile appoggiarsi a schemi grafici, come ad esempio un diagramma di flusso. In seguito si effettua un reperimento dei dati e ci si occupa della loro gestione. Per questi procedimenti esistono software dedicati che fungono da supporto alle aziende;
 - 3 **Valutazione dell'impatto**, il quale è rappresentato da una serie di parametri che ne definiscono il comportamento ambientale. Si trasforma ogni flusso di sostanza presente nella tabella dell'inventario in un contributo all'impatto. Per effettuare questa misura si prendono in considerazione diverse categorie di impatto: risorse, impatti locali e impatti globali;
 - 4 **Interpretazione risultato**, durante il quale i valori ottenuti vengono controllati per verificarne la coerenza con gli obiettivi fissati all'inizio. Questa fase richiede una grande esperienza e risulta necessario tenere traccia delle scelte effettuate. In molti casi occorre effettuare assunzioni, stime e prendere decisioni basate su valutazioni personali.

In conclusione questa tecnica di valutazione fornisce una migliore comprensione degli effetti sull'ambiente e sulla salute associati a ogni caso preso in esame. In particolare consente di effettuare una comparazione degli impatti di un prodotto con quelli di altri presenti sul mercato e di sviluppare, in conseguenza, miglioramenti da apportare al bene. Rappresenta inoltre uno strumento di riferimento per ottenere un'etichetta o certificazione ambientale del prodotto.

1.1.1 Ecodesign

L'analisi LCA fornisce un supporto allo sviluppo dell'Ecodesign (o eco-progettazione), il quale prende in considerazione i fattori ambientali studiati per la realizzazione progettuale di prodotti e/o servizi. L'ambiente quindi concorre sempre più alla definizione del design di un prodotto, indirizzandone la progettazione. Queste strategie si pongono come obiettivo la riduzione dell'impatto ambientale dell'intero

ciclo di vita del prodotto. Nell'applicazione di queste soluzioni si registrano per le aziende benefici di tipo economico, grazie a risparmi ottenuti mediante processi di produzione ottimizzati, l'uso di risorse provenienti da processi di riciclaggio e prodotti caratterizzati dal minor impiego di materiale e dall'assenza di sostanze tossiche o dannose. Infine l'integrazione dell'aspetto ambientale nei progetti permette alle aziende di adempiere agli obblighi normativi, previsti nelle direttive orientate al prodotto, e ottenere in questo modo la conformità europea.

Gli obiettivi di protezione e tutela ambientale vengono garantiti da questi strumenti mediante l'applicazione della cosiddetta "filosofia a 6 R", la quale si articola nei seguenti punti.

- **Ripensamento del prodotto** in un ottica di maggiore efficienza;
- **Replace**, ovvero la sostituzione dei materiali pericolosi con sostanze non dannose;
- **Riduzione del consumo di energia e della produzione di imballaggi e rifiuti;**
- **Riutilizzo**, principio sul quale si base l'idea che all'interno del rifiuto è possibile individuare un nuovo prodotto con lo stesso scopo oppure differente al precedente;
- **Riciclaggio**, in particolare di materiali quale vetro, alluminio, carta;
- **Recupero di materiali o energia.**

Al fine di mettere in pratica tali principi, e apportare in questo modo un miglioramento ai punti critici dei prodotti, i progettisti possono adoperare strategie di ecodesign applicabili a diversi livelli:

- A livello di comportamento del prodotto, operando una selezione dei materiali con basso impatto e riducendone l'uso;
- A livello di struttura del prodotto, ottimizzando le tecniche di produzione e migliorandone la rete distributiva;
- A livello di sistema di prodotto, determinando un aumento della sua qualità e facilitandone la riparazione.

Nell'adempimento di tali propositi occorre adottare un approccio preventivo e integrato. All'interno del progetto il prodotto viene quindi scomposto in componenti, prevedendo per ciascuno una riduzione di peso e volume. Osservando invece il processo produttivo nel suo complesso si cerca di ottenere una riduzione del numero di

fasi, necessarie alla sua realizzazione, e degli scarti di produzione generati da ciascuna di esse. Si tenta inoltre di prevedere nuove soluzioni di imballaggi praticabili nella distribuzione, riducendo il quantitativo di materiale impiegato al loro interno e progettando prodotti facilmente trasportabili. Le strategie che agiscono sull'ottimizzazione della vita economica⁵ del prodotto sono rivolte all'aumento della qualità e della semplicità di manutenzione e riparazione. In questo senso costituisce un valido aiuto la progettazione modulare, il quale permette di costruire beni complessi, partendo da elementi facilmente assemblabili e disassemblabili.

L'orientazione della progettazione al fine vita del prodotto è resa possibile da metodi innovativi, quali DFD (*Design For Disassembly*) e DFR (*Design For Recycling*), che supportano la sua manutenzione e la sua gestione al termine della vita utile. Il disassemblaggio può infatti costituire un'operazione laboriosa che rende limitate le possibilità di recupero di un bene dismesso. Tramite piccoli interventi, quali l'uso di saldature non permanenti e misure uniformi negli elementi di giunzione (tali da richiedere un minor numero di attrezzi per lo smontaggio), è invece possibile favorire il prelievo dei componenti di interesse e facilitare un'eventuale riparazione o sostituzione.

Le azioni possibili a livello di sistema comprendono anche lo sviluppo di un nuovo concetto di prodotto, in modo tale che risulti maggiormente compatibile con l'ambiente. Nei beni realizzati al giorno d'oggi si evidenzia sempre più la problematica dei "prodotti usa e getta". Infatti, nella maggior parte dei casi, essi esauriscono la loro vita economica dopo un singolo utilizzo e tale fenomeno determina la loro frequente sostituzione (che garantisce più vendite, ma anche maggiori impatti).

A tale fine si può ricorrere a una delle seguenti soluzioni:

- Dematerializzazione, principio secondo il quale occorre ridurre il quantitativo di risorse materiali nel prodotto e passare dal concetto di prodotto a quello di servizio;
- Uso condiviso dei beni;
- Prodotti multifunzione, i quali racchiudono più funzionalità.

⁵ Con la definizione di "vita economica" si intende l'intervallo di tempo che intercorre dal momento di acquisto di un prodotto a quello in cui esce dal sistema economico, poiché non risulta più in grado di soddisfare i bisogni e adempiere ai compiti previsti.

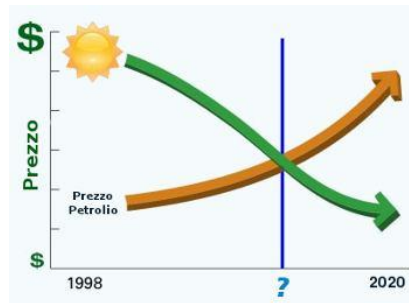
Adottare misure di Ecodesign significa intraprendere un percorso virtuoso che coinvolge diversi attori: produttori, consumatori e società. Secondo questo modello a ciascuno di questi soggetti vengono garantiti benefici e risparmi. Infatti, grazie alle strategie di ottimizzazione adottate dai progettisti, i produttori vanno incontro a costi ridotti e meno rifiuti da dover gestire. I consumatori invece acquistano prodotti più durevoli e affidabili, allungando il ciclo di vita previsto per i beni di consumo e evitando la loro sostituzione dopo un solo utilizzo. In conclusione si garantisce alla società un incremento della disponibilità di risorse, a cui si potrà attingere anche in futuro.

1.2 Sostenibilità del mercato fotovoltaico

In base alle riflessioni presentate nel paragrafo precedente appare fondamentale in tema fotovoltaico considerare che, sebbene si tratti di energia pulita, si rende necessario assumere un'ottica complessiva del progetto e valutare l'impatto che i sistemi determinano sia durante il processo di realizzazione che il trattamento a fine vita.

Per valutare la fattibilità del settore fotovoltaico si ricorre più volte al concetto di “**Grid Parity**”, il quale indica una condizione in cui un impianto di energia rinnovabile risulta in grado di recuperare i propri costi iniziali, assunti senza l'ausilio di incentivi economici diretti alla produzione energetica. Il suo raggiungimento dimostrerebbe quindi la sopravvivenza e la convenienza dell'energia fotovoltaica. Nella sua concezione più comune un impianto fotovoltaico soddisfa la *grid parity* quanto sussiste un'equivalenza tra il costo dell'energia prodotta (*Levelized Cost Of Energy*) e il costo di acquisto dell'energia elettrica dalla rete, ovvero il prezzo del kWh pagato in bolletta.

Tale punto di pareggio deriva dall'incontro di due curve di prezzo, caratterizzate da andamenti opposti. Da un lato il costo derivante dall'energia convenzionale aumenta nel tempo, mentre dall'altro quello del fotovoltaico va incontro a una diminuzione, grazie alla sua graduale affermazione e alle crescenti economie di scala.



Andamento costi del fotovoltaico e delle fonte convenzionali

La valutazione della *grid parity* impone la definizione del costo generato dall'impianto, il quale deve tenere in conto l'installazione, la manutenzione, la sostituzione di componenti (ad esempio l'inverter), l'assicurazione e l'insolazione media del sito in cui il sistema è installato. Tale valore di LCOE può ritenersi fissato in partenza con una buona precisazione e sarà confrontato con il prezzo dell'energia prelevata, il cui costo può risultare differente in base al profilo di utenza e alla tipologia di contratto. Per sua natura, quindi, il prezzo di acquisto risulta variabile nel tempo, anche se nel lungo termine destinato ad aumentare.

Questo valore appare quindi relativo al prezzo di vendita dell'energia "tradizionale", il quale a sua volta varia rispetto alla fascia oraria o la Regione di acquisto (ad esempio in Sicilia il prezzo risulta mediamente maggiore nei confronti della Lombardia). I primi mercati a godere della *grid parity* saranno in conclusione gli utenti che si ritrovano a pagare le bollette più care in località a elevato irraggiamento solare. Sulla base di queste ultime valutazioni si può quindi ragionevolmente presupporre che in Italia il raggiungimento di questa favorevole condizione economica prenderà piede (se già non si è affermata) a partire dalle regioni del sud, nelle quali gli impianti incontrano le migliori condizioni di esposizione solare e rendimento.

Riguardo la questione della possibilità di sopravvivenza del sistema fotovoltaico a livello di mercato globale risulta importante valorizzare un altro indicatore, ovvero l'**impronta ecologica**. Questo parametro viene utilizzato per misurare il consumo di risorse naturali da parte dell'uomo rispetto alle capacità naturali della Terra di rigenerarle. Nel dettaglio calcola la quantità di superficie, in termini di terra e acqua, che la popolazione umana necessita per produrre, mediante la tecnologia disponibile, le risorse che consuma e per assorbire i rifiuti prodotti. Il suo valore è emerso come unità di riferimento fondamentale della domanda di risorse naturali. Analizzando

l'impronta di un individuo, città, azienda o nazione è possibile quindi valutare la pressione esercitata sul pianeta, in modo da gestire le nostre risorse ecologiche più giudiziosamente.

1.2.1 Fattori di criticità

Secondo alcuni studi effettuati nel 2004, per poter sostenere il fabbisogno elettrico in Italia risulterebbe necessaria un'area di 1.861 km² abilitata al fotovoltaico, pari allo 0,62% del territorio italiano. Per tale conclusioni si è supposto un fattore di rendimento pari a 17,1% e una superficie di 8m² per kWp. Molte speranze vengono quindi riposte sul fotovoltaico, eventualmente integrato con altri sistemi di energia rinnovabile, il quale può provvedere alla sostituzione graduale della produzione energetica proveniente dallo sfruttamento di fonti fossili a favore di un'energia più pulita. La Germania si sta adeguatamente attrezzando, avviando molte centrali fotovoltaiche le quali vanno a sfruttare zone dismesse o tetti di grandi complessi industriali. Più discussa appare invece l'installazione su aree agricole e collinari, su cui l'Italia ha cominciato a applicare provvedimenti a partire del 2012.

Il principale ostacolo all'installazione di un impianto fotovoltaico e alla sua diffusione a livello globale è stato per lungo tempo l'alto costo degli impianti stessi, a causa anche della bassa efficienza, e di conseguenza dell'energia prodotta. Tale limitazione è stata largamente compensata negli ultimi anni dalla produzione su ampia scala, conseguenza diretta dell'incentivazione offerta alla produzione solare, la quale ha permesso un abbattimento sostanziale dei costi da sostenere.

Nell'ambito della resa energetica, le ricerche condotte sul silicio amorfo hanno fornito risultati inferiori rispetto alle aspettative, mentre in via sperimentale sono stati ricavati valori più promettenti da altri tipi di materiali (come diseleniuro di Indio e Rame, tellururo di Cadmio, ecc). Questi composti fanno però emergere alcune problematiche riguardo la disponibilità delle loro materie prime su larga scala.

Un limite intrinseco degli impianti fotovoltaici è rappresentato anche dalla sua non programmabilità della produzione energetica, riconducibile alla variabilità dell'irradiazione solare, dovuta sia alla sua totale assenza nelle ore notturne o in presenza di cielo nuvoloso, sia alle variazioni stagionali che si verificano tra estate e inverno. Tali problematiche declassano in parte l'efficacia delle energie rinnovabili

come fonte di approvvigionamento elettrico e, allo stesso tempo, rendono necessario l'integrazione di tali impianti con altre forme di produzione o accumulo energetico.

A queste considerazioni si aggiunge la necessità di una rete elettrica "intelligente" (di tipo *smart*), la quale supporti la generazione distribuita in modo tale da smaltire agli estremi della rete di distribuzione i flussi di energia intermittenti. Quest'ultimi infatti, se non correttamente gestiti, genererebbero sovraccarichi o improvvisi cali di tensione, con conseguenti ripercussioni sulla produzione e trasmissione dell'energia elettrica. Una parziale soluzione al problema deriva dalla generazione diffusa su piccole potenze attuata dagli impianti ibridi, i quali garantiscono la produzione di energia solo a fronte di equivalenti consumi, evitando in questo modo cessioni alla rete Nazionale.

Un'ultima questione da analizzare per un possibile utilizzo su scala globale dell'energia fotovoltaica corrisponde alla produzione di grandi quantità di moduli fotovoltaici, che comporterebbe la necessità di reperire materiali rari e il dovere di lavorare nel corso della fabbricazione anche grossi quantitativi di sostanze tossiche. Ad esempio, se si volesse soddisfare tutta l'energia elettrica di cui l'Italia abbisogna si dovrebbero impiegare circa 186.000 tonnellate di tetracloruro di stagno in aggiunta ad altre sostanze cancerogene, tipo cadmio, arsenico, ecc. Tale misura inoltre non tiene conto dei materiali necessari alla costruzione degli inverter, all'adeguamento della rete elettrica per provvedere alla produzione elettrica aleatoria e alla costruzione delle infrastrutture necessarie per lo stoccaggio dell'energia in eccesso. L'eventuale deposito dei pannelli esauriti in discariche prive di precauzioni potrebbe causare il rilascio di tali materiali nel terreno o nelle falde acquifere. Qualora si ricorresse al loro incenerimento, si provocherebbe invece l'immissione in atmosfera di fumi nocivi, con effetti dannosi per la salute e l'ambiente. Non appare quindi un caso che molti rifiuti simili vengano smaltiti in paesi non regolamentati, sottolineando ulteriormente l'importanza di una corretta gestione del fotovoltaico a fine vita.

2. LCA applicata agli impianti fotovoltaici

La gestione di un pannello fotovoltaico può essere dunque suddivisa in tre fasi: costruzione, generazione di energia elettrica e smaltimento a fine vita. Nel corso dei dibattiti sostenuti sulla sostenibilità ambientale del fotovoltaico le fasi di produzione e dismissione vengono solitamente omesse, quando invece le principali criticità emergono proprio durante la loro fabbricazione e gestione a fine vita, causate dall'impiego di sostanze nocive per la salute e l'ambiente.

All'interno di questo capitolo si andrà quindi ad analizzare singolarmente ogni fase che contraddistingue il ciclo di vita di un sistema fotovoltaico, fino alla sua dismissione orientata al riciclaggio. L'operazione di riciclo dei pannelli fotovoltaici rappresenta infatti un meccanismo da tenere sotto dovuta considerazione poiché, non soltanto sostiene l'ambiente, ma porta anche benefici economici ai nuovi produttori, i quali potranno tagliare notevolmente i costi di produzione grazie alla riduzione delle fasi di lavorazione e dell'energia necessaria per la creazione di nuovi prodotti. In questo modo le aziende si renderebbero autosufficienti e in grado di affrontare l'investimento derivante dall'installazione e il mantenimento dell'impianto.

Lo studio delle fonti di energie rinnovabili è un procedimento in corso già da tempo. Prima di giungere alla conclusione che il fotovoltaico rappresenti davvero una fonte di energia sostenibile occorre focalizzarsi sul suo intero ciclo di vita e sulla sua corretta gestione durante la sua dismissione.

Nel loro complesso i pannelli solari non presentano parti meccaniche in movimento o soggetti a usura e, quindi, è possibile desumere che possiedano una durata pressoché illimitata nel tempo. Tuttavia si rende necessario considerare che un impianto è sottoposto a intemperie e al degrado naturale, registrando così una durata media di 25-30 anni. Chi prende la decisione di accettare un sistema fotovoltaico nella propria abitazione si dimostra generalmente a una persona sensibile alle tematiche ambientali e dell'eco-sostenibilità. Diviene quindi poco accettabile applicare una scorretta gestione dei pannelli dismessi e adottare la discarica come soluzione per il loro smaltimento.

Il riciclo dei pannelli fotovoltaici diviene un procedimento indispensabile al fine di poter affermare la sostenibilità del fotovoltaico. Affinché il riciclaggio si dimostri

pienamente efficace risulta necessario orientare il prodotto a tale destino sin dalla sua progettazione. In quest'ottica le nuove soluzioni tecnologiche adottate nel settore prevedono che i relativi progetti seguano modelli di *design for disassembly* e *design for recycling*, al fine di semplificare le operazioni di smantellamento di un impianto e il suo successivo riciclo.

La recente affermazione delle cosiddette “tecnologie ambientali”, volte a produrre energia da fonti rinnovabili, comporta l'impiego di materiali particolari. Ad esempio, nella fabbricazione dei più recenti modelli di pannelli, osserviamo la presenza di indio, gallio e telluri. Lo sviluppo sostenibile comporta dunque un uso crescente di alcune risorse accomunate dalla caratteristica di risultare difficilmente sostituibili e poco disponibili in natura. Spesso accade che questi elementi, detti anche “metalli critici”, siano estratti in pochi Paesi, intensificando inevitabilmente le difficoltà future di approvvigionamento. Di conseguenza appare molto sentita l'importanza di affermazione a livello globale sia delle infrastrutture per il recupero di questi materiali sia delle tecnologie per il riciclaggio. Al riguardo risulta interessante osservare che il Giappone, nonostante sia un paese povero di indio, ne è divenuto il secondo produttore mondiale mediante il riciclo di rottami che lo contengono. In questo modo l'Indio alimenta le industrie che impiegano tale metallo, realizzando, almeno entro certi limiti, un ciclo chiuso del materiale.

2.1 Costruzione dei pannelli fotovoltaici

Come abbiamo già accennato, per poter parlare di sostenibilità del fotovoltaico diviene indispensabile coinvolgere il processo di riciclo nei meccanismi di gestione del prodotto, giunto al termine del suo ciclo di vita. Affinché il suo funzionamento sia efficace occorre riflettere sulle operazioni di riciclaggio sin dalla progettazione del bene. Le ultime ricerche effettuate al riguardo si stanno focalizzando, oltre a una realizzazione volta al riuso del prodotto a fine vita e a una ottimizzazione dei processi di riciclo, alla riduzione dell'impronta ecologica caratteristica del prodotto già in partenza, limitando per esempio l'impiego di materie plastiche. Questo intervento

riduce la dipendenza del fotovoltaico da fonti fossili (la plastica infatti costituisce un derivato del petrolio), portando a un'ulteriore riduzione di CO₂.

Nel mondo industriale si sta assistendo a iniziative tendenti a coinvolgere i produttori dei moduli fotovoltaici per il contributo fondamentale che questi possono apportare nel favorire il riciclaggio dei rifiuti. Infatti nei prodotti industriali giunti a fine vita le difficoltà di disassemblaggio, finalizzato al recupero di materiali da inviare alle corrispondenti filiere di riciclo, possono costituire un serio ostacolo a queste attività. Nei Paesi in cui il costo del lavoro risulta elevato queste operazioni possono essere rese impossibili, risultando fondamentali nella tutela dell'ambiente ma insostenibili dal punto di vista economico. Per questo motivo spesso molti prodotti RAEE o i loro componenti vengono smaltiti in discariche o inviati a inceneritori, comportando danni per l'ambiente e perdita di potenziale materiale da riutilizzare. Molti beni industriali vengono inoltre inviati in Paesi del Terzo Mondo, dove il basso costo della manodopera rende economicamente possibile il disassemblaggio, il recupero e il riciclo dei materiali. Tuttavia queste attività sono svolte in condizioni che non tutelano sufficientemente l'ambiente, la salute e l'incolumità degli operatori. Si sta quindi cercando di combattere questo allarmante fenomeno di esportazione dei rifiuti verso Paesi poveri o emergenti, all'interno dei quali si ricorre principalmente a trattamenti privi di adeguate misure di sicurezza e allo sfruttamento del lavoro minorile. Si rende dunque necessario un severo controllo dei movimenti che interessano i rifiuti pericolosi.

L'art.8 della Direttiva Comunitaria, il quale prende ispirazione al principio di "Responsabilità Estesa al Produttore", tende a stimolare le industrie manifatturiere a contribuire alla soluzione dei problemi sopracitati. È possibile osservare che all'interno dei settori nei quali vigono le leggi basate sul concetto di REP sono stati apportati numerosi cambiamenti sulle modalità di esecuzione della produzione. Le aziende hanno infatti iniziato a provvedere, sin dalla progettazione dei propri prodotti, a tutti gli accorgimenti utili a semplificare la gestione dei rifiuti, mediante il cosiddetto *Design For Recycling*, e i benefici derivanti appaiono subito tangibili. Ognuno di questi cambiamenti ha portato a una riduzione del costo di disassemblaggio e smaltimento dei componenti. Inoltre la possibilità di selezione dei materiali, realizzata

in migliori condizioni di purezza, permette di ottenere dal loro riciclaggio prodotti di più alto valore. Il ridotto uso di materiali non riciclabili e tossici diminuisce le spese da sostenere a favore di uno smaltimento legale. Essendo quindi stato reso possibile il perseguimento di obiettivi economici, vengono raggiunti anche quelli ambientali, come l'aumento della qualità dei materiali riciclati e la conseguente riduzione del ricorso a discariche e inceneritori.

I progettisti tendono infine a creare prodotti che mantengono prestazioni, durata e affidabilità nel tempo, prevedendone la loro manutenzione e agevolando le eventuali riparazioni che si renderanno necessarie. Talvolta il progetto contempla anche la predisposizione del prodotto a essere aggiornato con facilità, ritardando in questo modo l'obsolescenza tecnica e consentendo rendimenti soddisfacenti anche da oggetti non più recenti. Tutte queste caratteristiche nel loro insieme contribuiscono a ritardare l'entrata dei prodotti nel mondo dei rifiuti.

Nel momento in cui tutti questi impegni derivanti dalla REP comportano per le industrie dei costi, questi vengono internalizzati nel prezzo di vendita dei nuovi prodotti.

2.1.1 Preparazione del Silicio

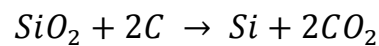
Il silicio costituisce il materiale maggiormente utilizzato dalle industrie per la produzione di celle fotovoltaiche. Nonostante risulti l'elemento più diffuso in natura dopo l'ossigeno, per poter essere opportunamente sfruttato deve presentare un elevato grado di purezza e un'adeguata struttura molecolare.

La disposizione molecolare interna può possedere forma monocristallina, policristallina o amorfa, a seconda della tipologia dei pannelli richiesti per la fabbricazione. All'interno della struttura monocristallina gli atomi sono orientati nello stesso verso e legati fra loro secondo la medesima modalità, mentre in quella policristallina gli elementi sono aggregati in grani monocristallini generalmente piccoli e orientati in modo differente. Infine nella struttura amorfa gli atomi sono orientati in maniera totalmente casuale.

Per la costruzione dei componenti elettrici viene impiegato il cosiddetto *silicio di grado elettronico*, le cui impurità devono presentarsi in misura inferiore a 1/100.000.000. Il silicio deve di conseguenza essere caratterizzato da una struttura

monocristallina. Attualmente la quasi totalità degli scarti di produzione vengono sfruttati dall'industria solare. Infatti per le celle fotovoltaiche è sufficiente il valore di impurità sia orientativamente minore di 1/10.000. Nonostante l'elevato costo di produzione, il quantitativo del silicio presente nei dispositivi risulta talmente piccolo da rendere il prezzo del materiale generalmente irrilevante (1%) nei confronti del costo complessivo del prodotto. Lo scarto proveniente dall'industria elettronica è considerevole e garantisce l'ottenimento di silicio mono o policristallino a spese inferiori di almeno un ordine di grandezza.

La materia prima da estrarre è costituita da minerali contenenti silicio in forma di ossido (SiO_2). Questi subiscono un processo di riscaldamento all'interno di un forno, il quale li porta a temperature superiori a 1900°C . Questo procedimento determina la produzione di silicio secondo l'equazione sotto riportata:



Il silicio liquido generato viene raccolto in fondo alla fornace all'interno di una lingottiera, in cui si solidifica. Il risultato così ottenuto presenta ovviamente molte impurità e viene definito *silicio di grado metallurgico* (puro al 98%). Tuttavia l'uso del silicio nei semiconduttori richiede una purezza più elevata rispetto a quella offerta dal silicio metallurgico. Si rende quindi necessario l'applicazione di processi di purificazione.

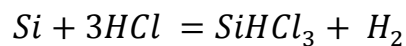
2.1.2 Purificazione del Silicio

Storicamente sono stati sviluppati differenti tecniche per ricavare silicio contraddistinto da maggiore purezza. I primi processi utilizzati costituivano metodi fisici, i quali prendono ispirazione dal fenomeno secondo cui, nel momento in cui il silicio viene fuso e lasciato raffreddare, l'ultima parte che si è solidificata racchiude la maggior parte delle impurità presenti. Seguendo questo ragionamento, una sbarra di silicio metallurgico viene riscaldata a partire da una delle sue estremità, fino a quando non iniziava a fondersi. La fonte di riscaldamento viene quindi lentamente spostata lungo la lunghezza della barra, mantenendo una piccola porzione di silicio fusa, mentre la parte lasciata dietro di essa si raffredda e solidifica. Al termine del processo

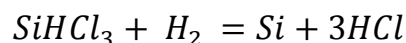
quasi tutte le impurità si sono concentrate nell'ultima parte della barra soggetta all'azione del riscaldamento. Di conseguenza tale estremità viene asportata.

Oggigiorno il silicio viene prevalentemente ottenuto attraverso metodi chimici, i quali prevedono la sua conversione in un composto che può essere purificato più facilmente rispetto al silicio stesso. Questo viene quindi nuovamente trasformato in silicio puro. Il composto comunemente impiegato è il triclorosilano, ma vengono ampiamente utilizzati anche il tetracloruro di silicio e il silano. Tali composti, portati allo stato liquido o gassoso, sono distillati in modo tale da ottenere una miscela contenente silicio.

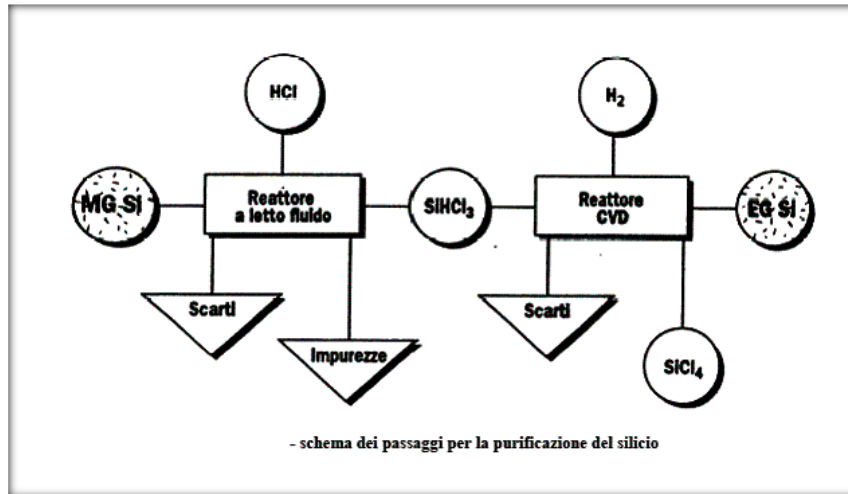
Il lingotto risultante dalla produzione del silicio tramite fornace ad arco presenta percentuali di impurità ancora eccessive. Si attua quindi una prima purificazione del blocco mediante il **processo Siemens**, il quale prevede un procedimento di gassificazione e due reazioni chimiche. Secondo il suo funzionamento, le barre di silicio metallurgico vengono inserite in un reattore a letto fluido, all'interno del quale viene immesso HCl in forma gassosa. In questo modo avviene la reazione dominante, che porta alla produzione di idrogeno e triclorosilano, come specificato nella formula:



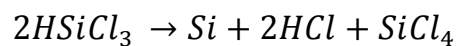
Il triclorosilano fluisce in un filtro e viene immesso, assieme all'idrogeno, nel reattore CVD (Chemical Vapor Deposition) generando la deposizione catalitica di silicio secondo la reazione:



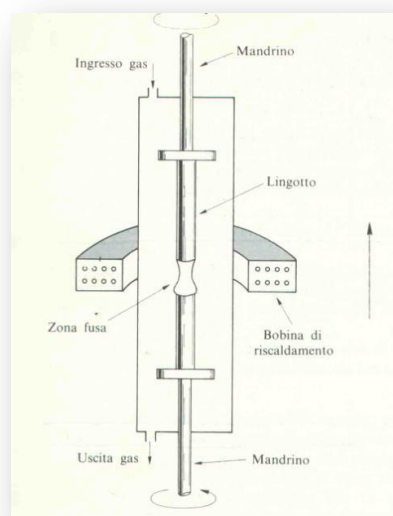
In entrambe le macchine le temperature raggiunte al loro interno corrispondono a 1150°C.



In conclusione a questi procedimenti i gas si sono decomposti e, a seguito della dissociazione del triclorosilano, si è formato nuovamente silicio. Quest'ultimo, andandosi a depositare sulla barra, determina un allargamento della sua sezione, secondo la modalità specificata dalla formula chimica seguente:



Per l'eliminazione di ulteriori impurità esiste un processo di raffinazione a zone, il quale determina una purificazione fisica. L'operazione di **fusione a zona** è stato il primo metodo ad essere impiegato su scala industriale. Seguendo questo procedimento, il lingotto di silicio viene agganciato verticalmente tramite un mandrino all'interno di un forno a radiofrequenze, nella quale si ottiene il riscaldamento del silicio mediante onde elettromagnetiche emessa da una bobina che circonda il forno.



Schema del macchinario impiegato per il processo di raffinazione

Il silicio liquido che si viene a generare scorre lungo la superficie del lingotto, accumulandosi verso il basso. Esso rimane aderente al lingotto perché caratterizzato da un'elevata tensione superficiale. Come risultato complessivo si determina, a seguito di un successivo raffreddamento, l'allungamento del lingotto, le cui impurità risultano concentrate alla sua estremità inferiore. Il lingotto viene quindi segato per eliminare tale estremità.

Tale procedimento può essere eseguito più volte nel caso si desideri una purezza ancora più elevata.

Il prodotto risultante da questo e processi simili viene definito *silicio policristallino*. Infatti, a causa dello stress provocato da tutti i trattamenti appena descritti, esso presenta una struttura suddivisa in una pluralità di zone, ciascuna delle quali contraddistinta da una propria organizzazione cristallina. L'irregolarità di questa organizzazione rende elevata la resistività del materiale. Nel caso si desideri ridurre tale caratteristica occorre fare in modo che la barretta possieda una struttura ordinata, formata da un solo cristallo. Esistono diversi procedimenti atti alla formazione del silicio monocristallino.

2.1.3 Crescita dei lingotti monocristallini

È possibile rincorrere a due metodologie principali per ottenere lingotti di silicio ad elevata qualità:

- **Metodo Czochralsky**, la cui tecnica consiste nell'immergere un seme di materiale altamente puro, in lenta rotazione, all'interno di un crogiuolo contenente silicio fuso. Gli atomi di silicio, aderendo al seme monocristallino, si orientano secondo la struttura del reticolo interno al seme e si solidificano rapidamente, mantenendo la configurazione assunta. Il seme viene quindi gradualmente estratto dalla massa fusa e, attraverso il controllo rigoroso della temperatura del silicio nel crogiuolo, dell'atmosfera nella camera e della velocità di estrazione, si rende possibile la regolazione del diametro del lingotto. Le impurità contenute vengono a concentrarsi nella parte inferiore dello lingotto stesso. Il prodotto così ottenuto viene sagomato in forma cilindrica e tagliato a fette (i cosiddetti *wafers*).

- **Metodo Float-zone**, il cui funzionamento prevede l'utilizzo di un cristallo con struttura e composizione spuria. Esso si muove nella zona in cui un materiale compatto appare liquido, orientandone gli atomi. In questo modo la zona fusa si riassetta in forma di monocristallo, ottenendo un solido di elevata purezza. Durante il procedimento la fusione viene effettuata a vuoto o in gas inerte e non si vengono a creare impurità, considerando che non avviene il contatto diretto del materiale come nella tecnica precedente. Le problematiche originate da questo procedimento sono correlate invece al collasso della zona fusa, la quale rimane compatta al solido unicamente grazie alle forze di tensione superficiale.

Mediante uno di questi processi si ottiene un lingotto monocristallo di forma cilindrica (da 13 a 30cm di diametro e 200 cm di lunghezza), da cui ricavare in seguito il wafer monocristallino.

La fetta di silicio multicristallo si origina invece dalla fusione e successiva ricristallizzazione di silicio proveniente dagli scarti dell'industria elettronica (così come avviene per il monocristallo). Da tale fusione si ottiene un "pane" che viene tagliato verticalmente in lingotti con forma di parallelepipedo. Un ulteriore taglio orizzontale determina la creazione di fette con spessore simile a quello delle celle monocristalline. Questo tipo di wafer consente efficienze interessanti a costi inferiori.

I processi di produzione delle celle fotovoltaiche si contraddistinguono in base al tipo di celle che si intende realizzare. Le differenze maggiori si individuano nella formazione della fetta di silicio, che rappresenta la struttura principale sulla quale verranno eseguite diversi trattamenti, specialmente di natura chimica, che porteranno alla formazione della cella vera e propria.

I processi finora descritti risultano ad elevato contenuto tecnologico e richiedono una forte capacità contrattuale a livello mondiale per ottenere i migliori prezzi di materia prima. A partire da 18 kg di materiale siliceo è possibile ottenere 1 kg di celle. In Italia esiste un produttore in grado di accrescere silicio, ovvero l'azienda multinazionale MEMC.

In seguito alla cristallizzazione si procede alla squadratura del lingotto in modo da eliminare le asperità meccaniche. Il taglio del silicio in fette costituisce l'operazione che attualmente determina la maggior perdita di materiale. La maggioranza dei

produttori si arresta a uno spessore di wafer dell'ordine di 0,3 mm. Celle caratterizzate da metà spessore o addirittura meno devono essere manipolate automaticamente per poter evitare rotture durante la loro movimentazione.

A questo punto è possibile realizzare il dispositivo fotovoltaico sfruttando l'esperienza tecnologica dell'industria elettronica. I processi che vengono eseguiti per la sua costruzione sono già stati ampiamente descritti all'interno del primo capitolo contenuto in questo elaborato.

In sintesi, sebbene non risulti difficile reperire il silicio nel suo stato "grezzo", occorre renderlo adatto alle sue molteplici applicazioni in campo elettrico e tecnologico. È il processo di lavorazione a cui viene sottoposto che ne determina il grado di purezza, il quale è indicativo del tipo di utilizzo che verrà fatto del silicio e del costo necessario per ottenerlo. Nello specifico, la sua produzione orientata alla realizzazione di pannelli solari comporta un alto livello di raffinazione, maggiore del silicio metallurgico, ma minore di quello elettronico. Il silicio impiegato per i moduli fotovoltaici costituisce quindi un prodotto industriale, il quale presuppone un certo processo di estrazione e lavorazione, e viene definito *silicio di grado solare*.

2.1.4 Consumo energetico speso per la produzione

La lavorazione di un pannello fotovoltaico richiede differenti quantità di energie. Il consumo primario è imputabile alla fabbricazione dei moduli. Nel dettaglio, a parità di superficie, risulta più oneroso la realizzazione di moduli cristallini.

A monte dell'intero processo sussiste l'estrazione della materia prima (silicio), la quale subisce un primo trattamento termico a 2000°C finalizzato all'ottenimento di materiale liquido che, una volta raffreddato, viene frantumato in modo da raggiungere una dimensione adeguata per il passaggio al seguente processo di lavorazione. Nel corso di questa prima frase sono consumati circa 15 kWh/kg di energia elettrica.

Allo scopo di rendere più puro il silicio, secondo i parametri richiesti dal settore, risultano necessari ulteriori trattamenti di tipo chimico. In particolare, i processi più impiegati determinano un consumo energetico medio di 110 kWh/kg.

Si susseguono infine una fase di cristallizzazione in lingotti e una di taglio mediante opportune seghe, fino a ottenere i sottilissimi wafer di silicio.

Gli studi compiuti sul ciclo di vita di un sistema fotovoltaico hanno rilevato che la fabbricazione di un modulo con celle solari riciclate garantisce un risparmio del 30% di energia necessaria rispetto alla produzione classica.

2.1.5 Costi da sostenere

Meritano un discorso a parte i costi di realizzazione delle celle fotovoltaiche, dei relativi moduli e degli impianti stessi. Per quanto riguarda le celle solari, i costi sono gravati di circa il 33% dal materiale (anche se la sua reperibilità non risulta difficoltosa), comprensivo degli scarti di lavorazione e l'oneroso processo di purificazione. Si devono inoltre considerare i restanti costi derivati dai processi di fabbricazione della cella. A livello di moduli fotovoltaici, oltre alle spese collegate alla cella, occorre aggiungere i costi di realizzazione del modulo, ovvero quelli relativi ai materiali assemblati, alla messa in posa a terra, all'elettronica di potenza necessaria (inverter), alla progettazione, alla manodopera e alla manutenzione. Andando a sommare ciascuna voce di costo si giunge a un valore indicativo di circa 0,75 €/Wp installato. Considerando quindi una producibilità media degli impianti installati in Italia pari a 1200 kWh/kWp all'anno e una durata della vita di un impianto superiore a 20 anni, il costo dell'energia prodotta risulta approssimativamente di 12-16 centesimi di euro per kWh prodotto. Queste valutazioni dimostrano che tale tecnologia, la quale per un periodo di tempo ha determinato costi superiori ad ogni altra fonte di energia, si sta ormai affermando come sistema competitivo di produzione energetica allo stesso livello delle altre fonti fossili.

In definitiva il parametro complessivo di qualità che contraddistingue un modulo fotovoltaico è fornito dal suo rapporto costo/efficienza o, in modo equivalente, il costo per kWh prodotto.

Vi proponiamo di seguito due tabelle contenenti i dati relativi alla composizione dei moduli cristallini e la corrispondente quantità di solido recuperabile attraverso il processo di riciclaggio. Le misure sono state ottenute da uno studio compiuto da Frisson nel 2000 e sono esemplificative dei vantaggi ottenibili mediante trattamenti di riciclo e il relativo materiale recuperabile.

	I costi/consumi energetici per produzione di moduli fotovoltaico	
	<i>Modulo primario (kWh/Wafer)</i>	<i>Modulo riciclato (kWh/Wafer)</i>
Produzione di silicio	7,55	-
Produzione di celle fotovoltaiche	0,65	0,65
Produzione dei moduli	1,12	1,12
Riciclaggio dopo la fine del uso	-	0,4
Somme	9,32	2,17
Consumo di energia generato	0,129	0,030

	I costi/consumi energetici per produzione di moduli	
	<i>Modulo primario (kWh/Wafer)</i>	<i>Modulo riciclato (kWh/Wafer)</i>
Input energetico	9,32 kWh/Wafer o 4,26 kWh/Wp	2,17 kWh/Wafer o 0,99 kWh/Wp
	Ammortamento Energetico dai moduli fotovoltaici	
Alta durata della luce solare	2,58 anni	0,6 anni
Media durata della luce solare	4,92 anni	1,14 anni

La durata media di un pannello fotovoltaico è valutata a circa 25 anni. Sebbene la sua vita utile risulterebbe superiore, il decadimento delle prestazioni e l'obsolescenza economica possono indurre alla loro dismissione. Infatti, dopo 25 anni, il produttore garantisce una resa energetica dell'80% rispetto a quella nominale e dunque, nonostante risulti ancora in parte efficiente, è da considerarsi rifiuto da trattare. Il suo riciclo previene lo spreco di materiali potenzialmente utili, riduce il consumo di materie prime ed energia e, conseguentemente, l'emissione di gas serra. Attualmente i rifiuti fotovoltaici provengono principalmente da moduli che hanno subito guasti o che funzionano con scarso rendimento, i quali vengono sostituiti prima dell'esaurirsi della loro vita utile, oppure da celle che si sono rotte durante il trasporto o l'installazione, o che sono state scartate durante la produzione, poiché non raggiungevano gli standard di qualità prefissati. I flussi di rifiuti sono direttamente correlati alla crescita del mercato e sono quindi andati incontro a una forte crescita.

2.2 Produzione di energia elettrica

2.2.1 Studi sulla convenienza del fotovoltaico

Abbiamo evidenziato come il contributo determinato dallo sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche da parte delle industrie del settore fotovoltaico possa impattare positivamente sul processo di creazione di prodotti ecosostenibili e sul loro corretto smaltimento futuro. In tema di produzione conveniente vengono svolti anche degli studi. Ad esempio, i ricercatori della University of Wisconsin-Madison ritengono di aver individuato la soluzione ideale nella sostituzione della pirite al silicio. Questo minerale, presente abbondantemente in natura, risulta decisamente più economico e potrebbe ridurre notevolmente il costo finale di un impianto fotovoltaico. Il problema principale dei film fotovoltaici in pirite risiede nell'efficienza di conversione molto bassa.

Attualmente i moduli in silicio appaiono spessi e necessitano di materie prime pure che rendono il processo di produzione costoso con un consumo energetico elevato. Un film in pirite di ferro o zolfo potrebbe rendersi 1000 volte più sottile e assorbire in modo altrettanto efficiente la luce solare. Alcuni difetti intrinseci alle proprietà del materiale riducono l'efficienza delle celle, tuttavia, dal momento che i ricercatori sono attualmente a conoscenza della ragione di questo limite, possono studiare soluzioni tali da aggirare il problema e rendere possibile la produzione di celle fotovoltaiche a basso costo.

Un ulteriore passo in avanti verso la riduzione dei costi proveniente dall'energia solare viene effettuato da un progetto avviato dai Sandia National Laboratories, realizzato in collaborazione con i ricercatori della University of Colorado-Boulder. Il team di scienziati incaricato sta lavorando a un materiale innovativo, in grado di superare i limiti di efficienza delle celle solari, sensibilizzato con colorante. Questa tecnologia appare molto promettente, risultando economica, resistente, trasparente e capace di assorbire una grande quantità di luce solare grazie alla tinta sensibilizzata che attrae i fotoni (proprio come avviene in natura durante il processo di sintesi clorofilliana).

Risulta evidente come un numero elevato di ricerche sia già stato condotto sin dalla prima apparizione dei sistemi fotovoltaici, al fine di conseguire l'obiettivo di

rendimenti energetici tali da riuscire ad affermare queste nuove tipologie di produzione elettrica. Analoghi propositi sono stati perseguiti dai ricercatori all'interno del **progetto Solarec MTBF** (Mean Time Before Failure), finanziato nell'ambito del Quinto Programma Quadro di Ricerca UE. Oggetto dello studio, che vede la collaborazione con LEEE (Laboratorio Energia Ecologia Economia) della Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana con il laboratorio del centro comune di ricerche Ispra, consisteva nella realizzazione dell'impianto TISO 10kW di Canobbio nel Canton Ticino. Esso rappresenta uno dei primi sistemi allacciati alla rete elettrica in Europa, tenuto costantemente sotto osservazione dall'istante in cui è stato messo in funzione nel 1982. La ricerca mirava a identificare la cause dei guasti e del deperimento dei moduli fotovoltaici, misurandone il degrado nel corso degli anni. Grazie all'analisi dei dati storici e al lavoro degli studiosi era stato possibile rilevare l'attuale resa energetica e registrare una perdita di potenza annuale pari a allo 0,2%.

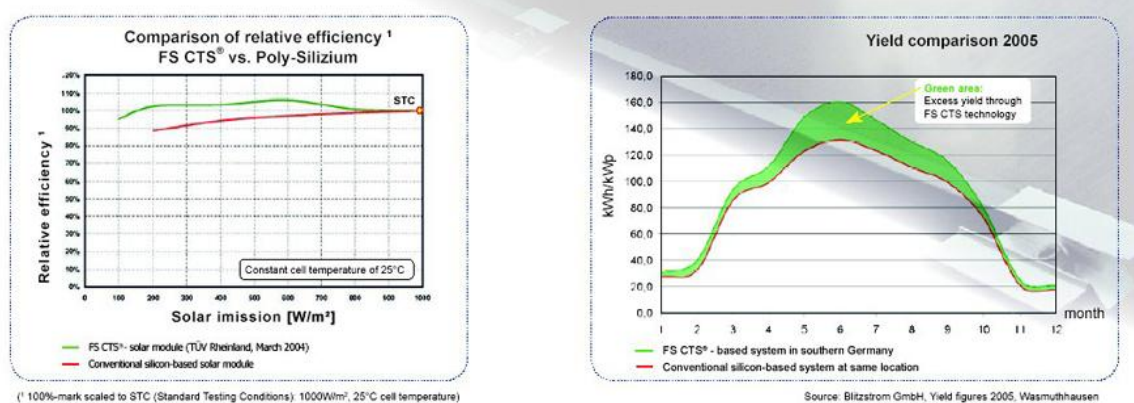
2.2.2 Promotori di tecnologie sempre più performanti

La ricerca in campo fotovoltaico è indirizzata verso il miglioramento del rapporto fra efficienza e costo del modulo. Infatti il valore tendenzialmente basso che caratterizza tale rapporto costituisce uno dei limiti più forti all'affermazione su grande scala di questa tecnologia energetica, che si traduce in un elevato costo per kWh prodotto almeno nel periodo di ammortamento dell'impianto. Di conseguenza, i progetti di sviluppo si orientano principalmente alla scoperta di materiali semiconduttori e nuove tecniche di realizzazione che coniughino basse spese e alta efficienza di conversione. A titolo d'esempio, la società cinese Suntech Power Holdings all'interno del proprio piano industriale del 2010 ha stimato di raggiungere nel 2015 un'efficienza di conversione su larga scala pari al 23%. Il record di rendimento è stato finora registrato dalla società Sharp, la quale nel 2013 ha prodotto celle contraddistinte da un'efficienza di 43,5% , mediante la combinazione di due o più elementi (come indio e gallio) e l'impiego di una struttura di base a tre strati per il foto-assorbimento.

Considerando i vantaggi perseguibili, i colossi del mondo fotovoltaico si stanno dimostrando sempre più interessati al processo produttivo del settore, implementandone notevolmente la ricerca. In particolare, l'azienda americana First Solar, leader nella progettazione di moduli fotovoltaici, ha recentemente annunciato di

aver realizzato in laboratorio celle solari al tellururo di cadmio contraddistinto da un'efficienza di 20,4%. Inoltre si sono ottenuti moduli a film sottile al CdTe più ampi rispetto ai tradizionali, caratterizzati da una superficie di 1,5 m² in confronto ai precedenti 0,7m². Questi risultati hanno determinato un abbattimento dei costi di produzione dell'ordine di 40 centesimi di dollaro per watt.

All'interno dei grafici presentati di seguito si visualizza la differenza di efficienza garantita dai pannelli prodotti da First Solar rispetto ai tradizionali cristallini. In particolare si osserva che l'elevato rendimento energetico, imputato a una migliore capacità di assorbire luce solare, si traduca in una maggiore resa annuale quantificabile fino al 20-25% in più.



Dall'inizio della sua attività nel 2002 First Solar ha realizzato più di 90 milioni di moduli per una capacità totale di 7 GW di potenza, sufficiente al fabbisogno di 3,5 milioni di appartamenti. L'azienda ricorre a un sistema di produzione estremamente efficiente ed economico che sfrutta una lavorazione a ciclo continuo, permettendo la fabbricazione di pannelli solari caratterizzati da basso costo ed elevata efficienza. Le celle al film sottile rappresentano quindi il miglior rapporto prestazioni/prezzo oggi presente sul mercato. I pannelli al CdTe non sono infatti condizionati dai continui aumenti di prezzo subiti del silicio, non contemplando tale elemento nella loro configurazione interna. Essi garantiscono inoltre un elevato rendimento energetico in qualsiasi condizione climatica, grazie a una migliore capacità di assorbire luce solare. L'insieme di queste caratteristiche permettono un ritorno economico dell'investimento più veloce. First Solar infine regola un fondo indipendente che persegue come unico scopo il ritiro e lo smaltimento dei pannelli, anche nei casi di fallimento o

inadempienza della stessa First Solar. Tutti i materiali ricavati da questi processi vengono riutilizzati per la produzione di nuovi pannelli solari.

Al giorno d'oggi si sta dunque assistendo all'entrata in produzione su scala industriale di celle fotovoltaiche a film sottile di telluro di cadmio. In Italia un impianto di fabbricazione di questi moduli è gestito da Arendi (Gruppo Marcegaglia), per il quale la società ha ricevuto 9 milioni di euro dal Ministero per l'Ambiente. Si tratta di una tecnologia estremamente promettente, che vanta un maggior rendimento e stabilità nel tempo rispetto al silicio. La notizia ha quindi suscitato notevole interesse sia per le promesse in termini di economicità che per i possibili rischi di salute. L'impianto del gruppo Marcegaglia prevede di realizzare pannelli solari per costi estremamente bassi (in particolare alcuni si sono spinti a dichiarare una spesa pari a circa un quarto del silicio amorfo). La progettazione appare quindi vantaggiosa perché si dimostrerebbe più economica, performante e veloce. La quantità di materiale utilizzata risulta infatti 100 volte inferiore rispetto a quella impiegata nei moduli di silicio. Inoltre il processo di produzione può essere reso completamente automatico, raggiungendo la fabbricazione di un modulo al minuto.

Oltre ai vantaggi promettenti garantiti da questa tecnologia esiste tuttavia un ulteriore aspetto che porta a dubitare sulla possibilità di utilizzo in grandi quantità di questa tipologia di moduli. È infatti comunemente riconosciuta la tossicità del Cadmio, anche se le possibilità di inalare, venire a contatto o in ogni caso riportare danni dalle celle contenenti questo elemento appaiono sostanzialmente nulle. Il telluro di cadmio è infatti un composto stabile, il quale non evapora a temperatura ambiente e non risulta solubile con nessuno dei materiali con cui potrebbe ragionevolmente entrare in contatto all'interno di una cella solare. L'unico eventuale scenario di pericolo può derivare dall'incendio di un edificio il cui tetto riporta installazioni di impianti al CdTe. Tale situazione è stata studiata nel dettaglio. Le conclusioni indicano che il vetro fonde molto prima che il composto evapori, incapsulando e neutralizzando quindi il rischio. Nella peggior caso possibile potrebbero verificarsi dei piccoli rilasci nell'ambiente in corrispondenza dei bordi, ma considerando la rarità degli incendi, i quantitativi immessi apparirebbero infinitesimali, soprattutto se confrontati con la

minacciosa quantità di plastica normalmente racchiusa in un edificio, la quale in presenza di un incendio crea micropolveri e diossine molto pericolose.

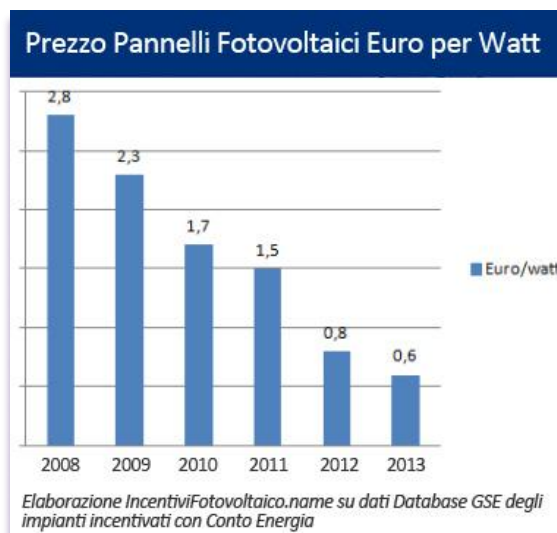
La problematica legata al cadmio non è tanto inerente al suo utilizzo all'interno delle celle solari quanto allo smaltimento degli impianti a fine vita. Occorre quindi evidenziare che, una volta terminato il loro impiego, le celle al CdTe devono essere opportunamente recuperate e riciclate. Al riguardo sono già stati preparati processi di trattamento da parte delle aziende produttrici il cui costo di riciclo è già stato incluso nel prezzo del modulo (che risulterebbe comunque molto più basso rispetto alle celle al silicio).

In seguito all'approvazione da parte del Parlamento della revisione della direttiva RoHS i pannelli fotovoltaici contenenti tellururo di cadmio non rischiano più di finire al bando e, almeno fino a questo momento, ne viene concessa quindi la produzione.

2.2.3 Analisi dei prezzi

Secondo recenti studi condotti, il prezzo dei pannelli fotovoltaici si è abbassato notevolmente negli ultimi anni ed è destinato a diminuire ancora nel prossimo futuro, anche se a ritmi minori. Per poter operare un confronto tra i vari modelli di moduli presenti sul mercato, caratterizzati da differenti materiali, dimensioni e rendimenti, si ricorre solitamente al prezzo unitario, espresso in €/Wp. In media possiamo affermare che nel 2014 i pannelli di produzione europea sono costati 0,50 €/Wp, mentre quelli asiatici un po' meno, ovvero 0,44 €/Wp. Sicuramente a questo andamento calante del prezzo hanno contribuito gli incentivi statali, i quali hanno permesso di realizzare economie di scala (alla base dei crolli dei prezzi).

Nel seguente grafico, elaborato su dati provenienti dal database GSE degli impianti incentivati, si può visualizzare la riduzione a cui è andato incontro il prezzo nel corso del tempo.



Una valutazione condotta dalla società americana Navigant Research, il cui gruppo di ricerca si propone di offrire un'analisi dei mercati globali in merito alle energie pulite, ha evidenziato come il prezzo dei moduli sia crollato da 4 \$/watt nel 2006 a meno di un dollaro nel 2012. In base all'evoluzione dei pannelli fotovoltaici, si è quindi previsto che il costo totale di un impianto fotovoltaico dovrebbe scendere a circa 1,5-2,2 \$/watt entro il 2020.

Nell'ultimo rapporto pubblicato sempre da Navigant Research si stima che le installazioni annuali del nuovo fotovoltaico raggiungeranno nel 2020 un valore più che doppio rispetto quello attuale di 73,4 GW. Si prevede inoltre uno spostamento generale del mercato verso i sistemi non distribuiti, imputabile ai prezzi più bassi relativi ai moduli fotovoltaici che stanno aprendo nuovi mercati (già nel 2014 gli impianti più piccoli di 1MW risultano poco meno della metà di tutti i nuovi sistemi installati). In gran parte del mondo quindi il prezzo al dettaglio dell'elettricità prodotta diventerà concorrenziale, anche senza dover ricorrere a incentivi statali.

2.3 Smaltimento dei pannelli fotovoltaici

È già stato evidenziato come la progettazione dei moduli a monte del processo concorra sempre più a favorire il loro trattamento a fine vita, il quale deve prevedere processi di riciclaggio e recupero. Infatti per poter affermare che il fotovoltaico costituisca una fonte energetica pienamente sostenibile occorre focalizzarci sulla sua

corretta gestione al termine della sua vita utile. Il riciclo costituisce una soluzione favorevole all'ambiente perché riduce il volume dei rifiuti generati e l'energia necessaria alla produzione dei materiali di partenza. Alcuni componenti che formano il pannello fotovoltaico sono realizzati con elementi rari o pericolosi, mentre altri presentano un elevato contenuto energetico. La presenza di questi elementi rendono questi prodotti classificabili nella categoria dei rifiuti pericolosi, così come vale per i rifiuti elettronici. Nel caso quindi venissero abbandonati in discarica potrebbero causare ingenti danni all'ambiente. Tuttavia il riciclo dei moduli richiede un processo complesso, dalla convenienza niente affatto scontata, che coinvolge una filiera di operazioni specialistiche (raccolta, trasporto, trattamento, dismissione), non semplici da giustificare economicamente, anche per materiali ad elevata efficienza energetica come l'alluminio. Il bilancio del trattamento a fine vita viene influenzato in modo rilevante dai costi del trasporto necessario a coprire le distanze fisiche che intercorrono tra i punti di raccolta e i centri di trattamento. Qualora siano presenti piccole quantità di pannelli da prelevare, oppure gli operatori siano dispersi sul territorio, i benefici economici ed ecologici del riciclo potrebbero essere minimi, se non negativi.

Per evitare l'adozione di soluzioni inadeguate, come le discariche o centri di stoccaggio a tempo indeterminato, appare indispensabile orientare sia la produzione che la gestione a fine vita ai processi di riciclaggio. In questo senso si adeguano non solo i componenti dei prodotti e le loro giunzioni, ma anche le operazioni di raccolta e recupero materiali a favorire processi corretti di dismissione, in modo da ridurre i costi e gli impatti ambientali legati alla logistica e alle attività di smaltimento.

Riguardo a questo argomento appare molto interessante uno studio effettuato da ReMedia , il quale sottolinea le problematiche della filiera dei RAEE (e quindi dei pannelli), prendendo in considerazione le evoluzioni future e i nuovi obiettivi imposti dall'Unione Europea. Analizzando la filiera a partire dai produttori, evidenzia una prima grave questione, ovvero quella inerente alla presenza di un canale informale di raccolta accanto al Sistema Ufficiale messo in atto dai consorzi. Una parte degli operatori commerciali non risulta quindi in regola agli standard richiesti e non garantisce la tracciabilità dei rifiuti da parte dello Stato. In particolare si calcola che 10 kg/abitante non segua il flusso ufficiale, concorrendo così a generare un grave danno a

livello ambientale ed economico. Non appare infatti certo che gli impianti utilizzati risultino tecnologicamente adeguati alle procedure di smaltimento. I corrispondenti danni si riveleranno ancora maggiori nel momento in cui i volumi di RAEE domestici aumenteranno in maniera considerevole nei prossimi anni. Si rende quindi necessario un cambiamento a livello normativo che impedisca agli operatori non ufficiali di sottrarre una parte consistente di rifiuti, in modo da assicurarne invece la tracciabilità. Il Sistema Ufficiale di RAEE domestici sfiora un costo di 180 milioni di euro, i quali, in un ipotetico scenario futuro formulato da ReMedia per il 2019, potrebbero superare i 700 milioni di euro in riferimento a una raccolta di quasi 1 milione di tonnellate. Alla copertura di questi costi partecipano tutti gli attori della filiera, ovvero Produttori, Enti Locali, Consumatori e Distributori. Questo studio pone le basi di un lavoro di raccolta, riciclo e corretta tracciabilità che deve essere intrapreso nei prossimi anni al fine di stimolare nuove filiere e migliorare gli standard di efficienza nel riutilizzo di materie prime-seconde, aprendo una nuova promettente frontiera di sviluppo della *Green Economy*.

2.3.1 Benefici derivabili dal riciclo

Un primo aspetto interessante derivante dall'applicazione dei trattamenti di riciclaggio è dato dalla possibilità di perseguire benefici di tipo ambientale, soprattutto in termini di emissioni in aria. Il riciclaggio di una tonnellata di pannelli al silicio garantisce infatti un risparmio di 800 kg di CO₂ e fino a 1200kg di CO₂ equivalente nel caso in cui il modulo sia fabbricato completamente con materie primarie. Non solo si sostiene l'ambiente, ma si ricavano anche benefici di tipo economico ai nuovi produttori, per i quali è possibile ottenere una notevole riduzione dei costi di produzione previsti. Il meccanismo del riciclaggio permette infatti di diminuire l'energia necessaria e le fasi di lavorazione richieste per creare i nuovi prodotti.

Tra le fasi previste per le operazioni di trattamento è presente il processo di scomposizione dei materiali, dal quale è possibile ricavare metalli ferrosi e non ferrosi, vetro, silicio e plastica. Ognuna di queste componenti può essere rielaborata e riutilizzata per creare nuove materie prime e prodotti.

2.3.2 Fattibilità economica del riciclaggio

Tenendo presente che uno dei requisiti fondamentali di un sistema di riciclaggio è rappresentato dalla sua sostenibilità economica, è stata valutata la fattibilità del riciclo di un pannello fotovoltaico mediante processo ad alto valore, che permetta di recuperare vetro e alluminio (come materiali di uso comune), e argento, silicio, indio, tellurio (come materiali non convenzionali). A partire dai dati medi relativi a caratteristiche (peso, potenza di picco, superficie) e composizione (peso percentuale dei vari componenti su quello totale), riferiti a moduli standard delle principali categorie di pannelli presenti ad oggi sul mercato, sono state calcolate le quantità di materiali recuperabili per unità di Wp. Ipotizzando che il prezzo dei materiali riciclati sia uguale a quello delle materie prime, sono stati incrociati i prezzi attuali di mercato dei materiali recuperabili con le relative quantità in modo da stimarne il valore e, di conseguenza, il ricavo ottenibile attraverso il riciclo.

Materiali	Tipologie di moduli fotovoltaici che li contengono	% di riciclo	Prezzo (€/kg)
Vetro	Silicio cristallino, silicio amorfo, CIS/CIGS, CdTe	95%	0.06
Alluminio	Silicio cristallino, silicio amorfo, CIS/CIGS, CdTe	100%	1.29
Silicio	Silicio cristallino, silicio amorfo	75%	1.86
Argento	Silicio cristallino, CdTe	60%	522.86
Indio	CIS/CIGS	60%	509.29
Gallio	CIGS	60%	224.69
Tellurio	CdTe	60%	74.90

Tabella illustrativa delle quantità di materiale ottenibili tramite processi di trattamento

Per completare il bilancio economico sono stati calcolati i costi da sostenere, i quali comprendono i costi logistici di raccolta e trasporto dei pannelli giunti a fine vita, quelli di trattamento e riciclaggio vero e proprio e, infine quelli di gestione dell'impianto di riciclo. Sono stati valutati i costi netti riferiti alle diverse tipologie di moduli, ottenuti dalla differenza tra i costi totali appena elencati e i ricavi derivanti da un processo di riciclaggio ad alto valore. Si ricava che il ricavo supera i costi solamente nel caso di moduli al silicio cristallino e per i CIS/CIGS, mentre per i moduli al silicio amorfo e quelli al CdTe i costi necessari al riciclo e recupero sono superiori, anche se di poco.

Costi netti di un processo di riciclaggio						
	Costi totali (€/t)	Ricavi (€/t)	Costi netti (€/t)	Costi totali per modulo (€)	Ricavi per modulo (€)	Costi netti per modulo (€)
c-Si	304.00	338.52	-34.52	6.08	6.77	-0.69
a-Si	216.00	205.04	10.96	3.42	3.25	0.17
CIS/CIGS	280.90	292.13	-11.23	4.24	4.41	-0.17
CdTe	282.00	280.24	1.76	3.38	3.36	0.02

Tabella di sintesi dei costi e ricavi imputabili al riciclo dei pannelli

Un aspetto rilevante dal punto di vista del trattamento e smaltimento dei rifiuti fotovoltaici proviene dall'origine dei pannelli fotovoltaici presenti a livello nazionale. Infatti, secondo i dati del 2011 forniti dal GSE, solo il 25% risulta prodotto da aziende italiane, mentre il 75% è importato da altri paesi. Di conseguenza appare difficile tracciare i materiali contenuti al loro interno. Aderendo al sistema Cobat, tutti i produttori di moduli associati al Comitato IFI, nonché i distributori e gli importatori operanti sul territorio italiano, potranno garantire ai propri clienti il ritiro e il successivo riciclo dei pannelli esausti, in modo da poter rilasciare agli stessi i certificati necessari per beneficiare delle tariffe incentivanti. Il relativo sistema di gestione sarà reso possibile da una mappatura geo-referenziata di tutti gli impianti installati a livello nazionale e l'implementazione di un sistema di tracciabilità dei moduli a fine vita. A supporto di queste operazioni viene istituita una banca dati centralizzata, resa accessibile per la consultazione anche da parte delle autorità competenti.

In seguito alla raccolta, il Consorzio si occuperà del frazionamento dei prodotti mediante il riciclo di tutte le componenti metalliche e vetrose, mentre la cella verrà inviata per completare lo smaltimento all'estero, essendo il nostro Paese attualmente privo di impianti simili. Per questo motivo è stato previsto l'istituzione di un Tavolo Tecnico che analizzi le tecnologie di trattamento esistenti e realizzi uno studio per un impianto-pilota. Potranno in questo modo essere sperimentate nuove modalità di riciclo sulla base delle quali prevedere la possibilità di realizzazione in futuro di un impianto nazionale.

2.4 Progetti di ricerca

Nell'ambito del Settimo Programma Quadro dell'Unione Europea, che ha permesso il finanziamento a ricerche finalizzate allo sviluppo tecnologico, è stato realizzato un progetto, denominato **CU-PV**, che si pone come obiettivo la realizzazione di pannelli fotovoltaici sostenibili "Cradle-to-Cradle" (dalla culla alla culla), adottando un approccio alla progettazione orientata alla realizzazione di sistemi efficienti e compatibili alla valorizzazione ambientale. Allo scopo di migliorare il profilo dei pannelli fotovoltaici al silicio, si studiano nuove soluzioni per la riduzione della presenza dell'argento e del piombo nei moduli e modalità innovative per ottenere un design sostenibile e un trattamento a fine vita di alto valore. Poiché il progetto coinvolge partner appartenenti all'ambito della ricerca, della produzione e del trattamento dei rifiuti, CU-PV copre l'intero ciclo di vita di un modulo al silicio.

Il fotovoltaico costituisce un'energia pulita, tuttavia la realizzazione dei moduli comporta il consumo di risorse e, infine, al termine dell'intervallo di vita utile, i pannelli esauriti contribuiscono alla generazione di rifiuti elettronici. I metodi correnti di produzione solare assorbono un significativo quantitativo di elettricità e dipendono ancora sulla reperibilità di alcuni materiali critici. Più aumentano le installazioni fotovoltaiche, maggiore diviene l'urgenza di orientare tutte le fasi di vita del fotovoltaico a una corretta gestione e smaltimento a fine vita.

In questo senso il progetto si prefigge una serie di obiettivi:

1. La riduzione della necessità energetica nella costruzione dei moduli, sviluppando una configurazione delle celle solari che adoperi meno silicio, wafer più sottili e che, allo stesso tempo, ne aumenti l'efficienza di conversione;
2. La minimizzazione dell'impiego di materiali critici, come l'argento e il piombo. A tale scopo il progetto ricercherà nuovi processi basati sulla tecnologia *ink-jet*;
3. Il miglioramento dei processi di riciclo dei moduli, attraverso design avanzati e la collaborazione dei soggetti appartenenti alla catena del valore inerente il riciclaggio. Nel dettaglio il progetto sviluppa e testa soluzioni alternative rispetto alle pratiche correnti, valutando la loro sostenibilità dal punto di vista economico

Fra i risultati attesi dalla progettazione si ambisce alla creazione di pannelli ad alta efficienza, la cui struttura si basa su wafer molto sottili, allo scopo di ottenere una riduzione del silicio rispetto l'energia prodotta del 50% e del valore di *Energy Pay Back Time*⁶ del 30%.

Inoltre si vuole dimostrare che l'adozione delle nuove tecniche di metallizzazione permetteranno una diminuzione quasi totale dell'argento e che le nuove connessioni tra le celle non richiederanno più l'impiego di piombo, la cui presenza a lungo termine risulta inaccettabile. Anche il consumo di argento all'interno delle celle fotovoltaiche appare insostenibile in relazione ai target nazionali ed europei, che si prefiggono per il 2020 una quota di energia rinnovabili pari al 20%.

Viene anche valutato l'applicazione di strumenti *design for recycling* sul profilo dei pannelli solari, i quali permetterebbero di evitare l'applicazione di lavorazioni dispendiose per effettuare il riciclaggio e ridurrebbe l'energia necessaria a trattare i materiali contenuti. In questo modo il processo di riciclaggio produrrebbe in uscita materia ad elevata purezza e qualità.

Infine si intende migliorare il parametro relativo all'impronta ecologica. Attualmente il dispendio energetico necessario per la produzione di silicio è pari a circa 1 kWh, il quale si traduce in circa 15.000 tonnellate di emissioni di CO₂ per la produzione annuale di 30 GW_p di moduli fotovoltaici. Il progetto determinerebbe un dimezzamento delle emissioni per W_p.

⁶ L'Energy Pay Back Time rappresenta un indicatore del tempo di ritorno energetico, ovvero l'intervallo necessario affinché un determinato impianto fotovoltaico produca una quantità di energia pari a quella utilizzata per la sua realizzazione. Tale valore viene solitamente espresso in anni.

3. Il raggiungimento della *grid parity*

Da tempo ci si interroga sulla questione se in Italia il fotovoltaico abbia raggiunto o meno la *grid parity*, vista la recente soppressione degli incentivi economici. Senza il contributo offerto da queste tariffe statali, l'installazione di un impianto fotovoltaico sulla propria abitazione conviene nella misura in cui garantisce una sufficiente quota di autoconsumo, ovvero di risparmio in bolletta. Ancora oggi i clienti domestici possono contare sulle detrazioni fiscali, mentre le aziende sono in grado di recuperare i loro investimenti solo attraverso la capacità di generare risparmi.

La condizione di *grid parity* verrà raggiunta non appena il costo dell'energia elettrica prodotta dall'impianto (in graduale discesa) diverrà uguale o inferiore a quello determinato dalla produzione energetica derivante dai combustibili fossili (in continuo aumento dato il progressivo esaurirsi delle risorse). Secondo le previsioni di Assosolare, Associazione Nazionale dell'Industria Fotovoltaica per la promozione e lo sviluppo del settore in Italia, si afferma che nel nostro territorio tale situazione non appare lontana e verrà raggiunta entro pochi anni per la totalità dei clienti energetici. In molti casi tale condizione vantaggiosa è già stata raggiunta. In particolare uno studio curato da McKinsey & Company afferma che l'Italia, assieme alla California, rappresenta il paese più prossimo al raggiungimento della *grid parity*. In conclusione la produzione "in proprio" e l'autoconsumo di energia fotovoltaica appare conveniente rispetto al suo acquisto in bolletta.

Con l'espressione *grid parity* si intende un rapporto tra il costo del kWh autoprodotta e il costo del kWh acquistato. La vera discriminante che rende conveniente l'utilizzo del fotovoltaico è rappresentata dalla quota di autoconsumo. Condizione giusta per rendere il fotovoltaico un investimento conveniente, anche senza ricorrere a incentivi o detrazioni, risiede nel consumo totale dell'energia prodotta. L'accumulo elettrico rappresenterà una svolta decisiva per far compiere all'Italia un ulteriore passo verso la riduzione dei costi, in modo da arrivare al pieno raggiungimento della *grid parity*. Da quel momento in poi il settore sarà in grado di sopravvivere senza dipendere da alcuna sovvenzione statale.

Ultimamente l'industria solare europea ha subito l'aggressiva concorrenza in termini di prezzo messa in atto dalle aziende asiatiche. È stato accertato da un'indagine che

quest'ultime hanno assunto il dominio del mercato continentale. Dopo una serie di querele, l'UE ha varato una serie di dazi sull'importazione dei prodotti fotovoltaici, che appena un paio di mesi dopo sono stati superati da un accordo sui prezzi minimi, il quale stabilisce che i pannelli cinesi non possano essere venduti al di sotto di una certa soglia di prezzo. In questa fase di contesa con l'Asia, appare sempre più necessario un'ulteriore svolta tecnologica che permetta l'abbassamento dei costi e l'acquisto dei moduli da parte di utenti comuni. A questo proposito l'EPIA si è espressa con favore nei confronti dei negoziati per la liberalizzazione del commercio di beni ambientali (compresi i pannelli solari), la quale stimolerebbe la crescita del settore, favorendo opportunità di business lungo tutta la catena del valore. Si sollecita quindi una stipula di accordi bilaterali tra stati al fine di superare le problematiche ancora persistenti, poiché il protezionismo frena le potenzialità del settore sopra espresse.

EPIA, in collaborazione con Greenpeace International, aveva redatto nel 2011 il suo annuale rapporto, nel quale affermava che entro il 2015 i prezzi del fotovoltaico sarebbero calati del 40%, entrando così in competizione con i prezzi dell'elettricità sostenuti dalle famiglie nei prossimi 5 anni. All'interno del report si prevedeva che il fotovoltaico risulterebbe in grado di assorbire il 12% della domanda europea nel 2020 e il 9% del mondo nel 2030. Sembrerebbe che l'era dell'energia solare bisognosa di sussidi per dimostrarsi competitiva stia dunque volgendo al termine.

3.1 Studi di grid-parity

In alcuni paesi europei, come Italia e Germania, il settore fotovoltaico risulterebbe già in grid-parity. A sostegno di questa tesi troviamo uno studio intitolato "PV Grid Parity Monitor", realizzato dalla società spagnola/tedesca di consulenza in tema di fonti rinnovabili **Eclaron**, il quale afferma che il raggiungimento di tale condizione economica sarebbe avvenuta già nel corso del 2013. Il partner di Eclaron nella ricerca, David Pérez, spiega come in questi Paesi, attraverso una regolazione corretta della rete elettrica, gli impianti gestiti per l'autoconsumo rappresentano una valida e redditizia alternativa per la produzione energetica. Tale risultato è stato raggiunto nonostante il drastico calo degli incentivi e le discutibili misure retroattive attuate dai governi.

Questo studio è principalmente focalizzato sul fotovoltaico residenziale, tuttavia, considerando che per impianti fotovoltaici di taglia superiore a 3 kWp il costo dell'energia generata dovrebbe ridursi per merito delle economie di scala, dai dati raccolti si potrebbero estrapolare alcune indicazioni sulla convenienza degli impianti di dimensioni maggiori, sempre finalizzati all'autoconsumo, installati su tetti o in prossimità di piccole-medie aziende.

L'analisi coinvolge quattordici città di sette nazioni diverse e tiene conto di una vita utile pari a 30 anni per l'installazione di un impianto di potenza pari a 3,3 kWp. Per stabilire il raggiungimento o meno della *grid parity* viene confrontato il costo di produzione dell'energia elettrica con il prezzo marginale del suo acquisto dalla rete (dalla tariffa totale sono sottratti i costi fissi in quanto il risparmio del consumatore sarà essenzialmente legato alla riduzione delle spese in bolletta).

Il tasso di remunerazione dell'investimento per l'Italia è fissato pari a 5,1%, di cui 2,1% per compensare l'inflazione e 3% come premio di rischio. Tale valore non si discosta molto da altri investimenti finanziari a basso rischio. Secondo quanto viene affermato dal rapporto, gli impianti domestici installati a Roma e a Palermo hanno raggiunto la condizione di *grid parity* grazie alla forte riduzione dei costi relativi ai pannelli avvenuta negli ultimi anni e agli elevati costi di acquisto dell'energia elettrica. Lo studio pone in evidenza il meccanismo dello Scambio sul posto come supporto fondamentale agli impianti, poiché garantisce l'autoconsumo, diretto o differito, della totalità dell'energia elettrica prodotta. Per completezza occorre sottolineare che le conclusioni di questa analisi sono state tratte da un confronto di due valori di costo che non hanno attinenza diretta con il consumo elettrico dell'abitazione. Inoltre i valori di irradiazione attribuiti alle due città appaiono molto simili tra loro, quando invece dai dati presentati Enea tali misure presentano uno scostamento del 10%.

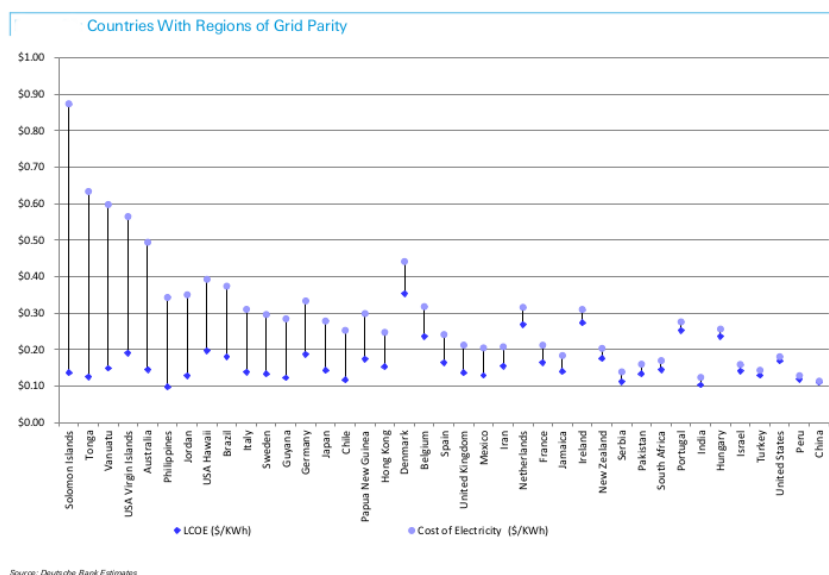
Sempre sul tema delle energie rinnovabili, l'**International Renewable Energy Agency** (IRENA) afferma che il costo del kWh generato dai pannelli solari risulta già inferiore a quello prodotto dai generatori diesel a gasolio, tenendo conto sia del fotovoltaico di piccola scala che quello industriale su grandi superfici. I dati raccolti nel report "Renewable Power Generation Costs" dimostrano infatti che le fonti rinnovabili apparirebbero già oggi competitive rispetto alle classiche produzioni

alimentate a combustibili fossili nei siti in cui non è presente l'accesso alla rete ed è necessario produrre in loco l'energia consumata. Tali conclusioni sono state ricavate da analisi innovative e originali compiute sui costi di 8.000 impianti di generazione rinnovabile presi in considerazione. Il rapporto mostra come i costi di produzione dell'energia pulita risultino talmente in calo da stravolgere i tradizionali canoni economici a cui il nostro sistema energetico ha fatto riferimento fino a oggi.

Anche l'ultimo report steso da **Deutsche Bank** (banca d'investimento globale per servizi e soluzioni finanziarie rivolte a clienti privati, di business o istituzionali) rileva il punto attuale della situazione fotovoltaica per uso professionale nei maggiori mercati a livello mondiale, affermando che nel giro di pochi anni il fotovoltaico risulterebbe in *grid parity* nel 50% dei mercati potenziali e nello scenario migliore addirittura nell'80% entro la fine del 2017. Nella delineazione di questo panorama particolarmente ottimistico, innovativi modelli di business realizzati dalle aziende a valle della filiera spingeranno le installazioni di nuovi sistemi solari e garantiranno maggior valore agli investimenti, attraverso soluzioni di *storage* più economiche.

Questa analisi conferma che i pannelli solari in molti paesi, come l'Italia, sono in grado di valorizzare l'investimento senza il bisogno di alcun sussidio da parte dello Stato. Si prospettano quindi grandi possibilità di guadagno per coloro che riusciranno a commercializzare per primi le tecnologie di accumulo più convenienti. Infatti, considerando le piccole imprese commerciali capaci di concorrere al 50% o più di autoconsumo, il solare si afferma come fonte competitiva nei confronti dell'energia comprata dalla rete in gran parte del territorio italiano. La maggior parte della crescita riguarda dunque impianti di piccola scala.

Gli analisti della banca tedesca confermano che attualmente i costi di produzione del fotovoltaico non incentivato oscilla tra 0,11-0,22 €/kWh (0,13 – 0,23 \$/kWh), dunque molto al di sotto dei costi dell'elettricità acquisita dalla rete. A supporto di questa tesi presentano un grafico esplicativo della situazione solare in vari mercati.



Con l'aumento della competitività, i mercati potenziali a cui il fotovoltaico può rivolgersi passerebbero in 5 anni dai 140 GW/anno attuali a 260 GW/anno.

Per l'anno 2015 è previsto una crescita della domanda sempre più diversificata: nel primo semestre pesa l'incertezza in paesi importanti come Giappone e Regno Unito, la quale sarà però compensata durante il secondo semestre dalla crescita in USA, Cina e altri mercati emergenti. La maggior parte delle imprese produttrici non sta pianificando rilevanti incrementi di capacità produttiva, quindi l'equilibrio tra domanda e offerta dei moduli risulterà relativamente stabile.

Deutsche Bank osserva con estremo interesse il mercato del fotovoltaico su tetto, in particolare negli USA, dove diverse compagnie elettriche entreranno nel settore ponendosi in competizione con gli operatori del fotovoltaico. A conferma di questo nuovo trend da parte dei dirigenti americani, Austin Energy (azienda di fornitura) ha recentemente siglato un accordo ventennale che le garantirà l'energia da un parco solare a meno di 5 centesimi al kWh. Infatti nello stato del Texas e, soprattutto, nelle zone delle Grandi Pianure degli Stati Uniti si gode di una favorevole esposizione solare.

In sintesi il rapporto dimostra estrema fiducia nei confronti del settore fotovoltaico. D'altra parte i trend descritti dagli analisti appaiono già visibili: negli ultimi otto anni il calo dei prezzi dei sistemi ha registrato un tasso annuale di circa il 15% e gli investimenti nella generazione distribuita, soprattutto nel fotovoltaico su tetto, sono cresciuti del 34% nel corso del 2014. Tali stime potrebbero percorrere gli andamenti

previsti in maniera più lenta, ma la direzione si dimostrerà sicuramente quella attesa dagli operatori del settore.

All'interno del nostro Paese, affermare che un impianto fotovoltaico in esercizio risulta in *grid parity* può assumere il significato di produzione energetica effettuata senza il ricorso a incentivi previsti dal Conto Energia, con remunerazione economica per la quota parte immessa sulla rete in regime di Scambio sul posto o mancato costo d'acquisto dell'energia elettrica per la quota autoconsumata. I due regimi commerciali citati prevedono modalità di funzionamento zonali in autoconsumo totale o ibrido, in ragione della classe di potenza impiantistica e del profilo del cliente produttore.

Uno studio realizzato dall'**Energy & Strategy Group** del Politecnico di Milano aggiunge all'espressione di *grid parity*, definita come situazione di parità fra costo di produzione elettrica da un impianto e quello di acquisto dalla rete, un'ulteriore connotazione. Si ritiene raggiunta questa condizione nel momento in cui l'investimento su un sistema fotovoltaico risulterà economicamente conveniente, in termini di rendimento, anche in assenza di incentivi. Nel nostro territorio esso rappresenta un traguardo totalmente alla nostra portata, rivelando in ogni caso notevoli differenze nella convenienza imputabili alla localizzazione dell'impianto, la tipologia dello stesso e all'uso che viene fatto dell'energia prodotta.

All'esercizio in *grid parity* è quindi associato un costo di generazione del kWh fotovoltaico, ma anche un tasso interno di rendimento del sistema impiantistico.

4. Sopravvivenza del settore fotovoltaico

In Italia il mercato fotovoltaico appare vivo e soprattutto conveniente. L'installazione di un impianto rappresenta una buona possibilità di investimento, sia per le abitazioni, che le imprese in grado di incorrere in un'elevata quota di autoconsumo elettrico.

Per merito delle detrazioni fiscali applicate alle ristrutturazioni edilizie, l'adozione di pannelli solari risulta una scelta ragionevole per le famiglie. Un piccolo impianto da 3 kW presenta un costo indicativo di circa 7000-7500 € (IVA inclusa) ed è in grado di

produrre dai 3.300 ai 4.500 kWh all'anno. Tenendo in considerazione gli sgravi, è possibile recuperare il costo in 6-8 anni e ottenere nell'arco della sua vita utile un risparmio netto di 20.000 €. Questi dati sono stati esposti e dimostrati all'evento italiano SolarExpo a Fiera Milano.

Anche per le imprese italiane l'opzione fotovoltaico si dimostra economicamente interessante, sebbene queste non possano godere degli sgravi fiscali. Le PMI infatti possono garantirsi un notevole alleggerimento della bolletta installando un impianto sul proprio tetto, poiché è stato evidenziato che esse per l'acquisto dell'energia elettrica pagano il 30% in più rispetto alla media dei prezzi nell'Eurozona. Il risparmio si dimostra tanto più elevato quanto più i consumi si concentrano nelle ore di produzione giornaliere. Il costo del kWh prelevato dalla rete risulta molto caro perché include oneri relativi alla rete e al sistema. In confronto un kWh autoprodotta può costare il 37-50% in meno.

È già stato esplicitato il fatto che, grazie alla combinazione fornita dal forte calo del prezzo degli impianti, le elevate spese in bolletta e una favorevole radiazione solare, in molte parti del Paese è stata raggiunta la cosiddetta *grid parity*. Dal 2015 un progetto perseguibile da parte sia delle imprese che le famiglie sarà l'autoconsumo. Senza più incentivi a disposizione, si ritiene una valida soluzione l'utilizzo dell'elettricità prodotta dal proprio impianto, in modo da far coincidere produzione e consumi. Non sempre risulta possibile ottenere quest'ultima condizione, perciò diviene molto utile abbinare al fotovoltaico una serie di tecnologie in grado di gestire in modo intelligente i carichi elettrici (ad esempio facendo prelevare al frigorifero l'energia necessaria proprio quando l'impianto sta producendo). Per incrementare la quota di autoconsumo possono costituire un valido supporto le batterie e gli inverter integrati con accumuli. Questi nuovi componenti dell'impianto consentono di stoccare l'energia che non si consuma sul momento per poterla impiegare successivamente. Da un punto di vista economico anche per queste apparecchiature è previsto un calo dei prezzi del 30-50% entro 4 anni.

Si vuole infine ricordare un ulteriore aspetto incentivante nei confronti del settore fotovoltaico. È stata infatti ultimata una normativa, la quale consente a un operatore che installa un impianto sul tetto di un cliente di vendere direttamente a quest'ultimo

l'elettricità solare prodotta. L'impianto rimane dunque di proprietà della ditta, la quale si impegna contrattualmente a cedere al cliente l'energia generata dall'impianto per un determinato periodo a un prezzo bloccato (ovviamente inferiore a quanto il cliente pagherebbe acquistandola dalla rete). Questa particolare configurazione è definita Sistema Efficiente di Utenza.

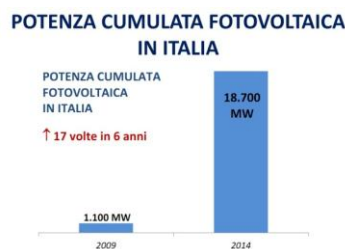
4.1 Investire nel fotovoltaico

Alcuni provvedimenti, messi in atto a cavallo della chiusura del piano incentivante previsto dal Conto Energia hanno in parte compromesso la redditività di un impianto fotovoltaico. Tra le misure governative applicate risulta sufficiente nominare l'abolizione dei prezzi minimi garantiti per il ritiro dedicato, i cambiamenti nel trattamento fiscale di determinati impianti (i quali sono ora considerati beni immobili, e quindi soggetti a tassazione), le nuove commissioni assegnate al servizio GSE, la non restituzione prevista per gli oneri generali di sistema nella modalità Scambio sul posto (la quale penalizza in particolar modo gli impianti compresi tra 20 e 200 kW di potenza). Infine un provvedimento che ha già ottenuto diverse polemiche e ricorsi legali è quello dello "Spalmaincentivi", con il quale viene di fatto modificato un contratto che lo Stato aveva stabilito con tutti i proprietari di impianti.

Nonostante tutte queste azioni istituzionali debilitanti, il bilancio per questa tecnologia appare positivo. Si stanno infatti sviluppando favorevoli condizioni per il rilancio del settore: la delibera sulla *storage*, l'opportunità offerta dai SEU, le condizioni di Scambio sul posto innalzate a 500 kW, le maggiori certezze sugli oneri generali di sistema e infine la continua, anche se più lenta, riduzione dei costi.

Per poter valutare l'impatto cumulativo dei provvedimenti attuati è stato organizzato a Roma il workshop "Investire nel parco fotovoltaico italiano esistente" lo scorso 28 novembre, il quale ha condotto alla realizzazione di uno Speciale Tecnico. L'obiettivo corrispondeva nel comprendere come fosse possibile valorizzare e proteggere gli investimenti realizzati negli impianti, soprattutto quelli di taglia medio-grande, attraverso la partecipazione e gli interventi di quotati esperti del settore. L'Italia si può in futuro dimostrare il paese pioniere di queste tecnologia, divenendo esponente di una svolta epocale. Quello che ancora non appare certo è la comprensione dell'alto valore

economico fornito dal fotovoltaico da parte dei decisori politici. Solamente rendendo più solidale l'attuale parco fotovoltaico nel suo valore economico e nella sua produzione si potrà guardare con maggiore fiducia verso il futuro di un settore che sta raggiungendo la sua piena maturità. Infatti il numero degli impianti installati su territorio italiano supera ormai le 570.000 unità. La fonte solare sta dunque assumendo un ruolo sempre più significativo nella generazione energetica: in meno di sei anni la domanda elettrica nazionale soddisfatta dal fotovoltaico è passata dallo 0,24% al 7,6%.



4.1.1 Il contributo fornito dai SEU

Le installazioni di impianti fotovoltaici nel 2014 sono suddivisibili essenzialmente in due segmenti: poco meno della metà risultano impianti di potenza inferiore ai 6kW (probabilmente realizzati grazie alle detrazioni fiscali), gli altri sono impianti sopra i 6 kW di potenza e installati in assetto SEU. Durante l'anno si è discusso ampiamente del tema Sistemi Efficienti di Utenza, vivendo una situazione di particolare incertezza. Le prime stesure del pacchetto Taglia-bollette prevedevano infatti un futuro aumento non quantificabili degli oneri sull'autoconsumo, i quali avrebbero reso impraticabile la soluzione fotovoltaica nella produzione energetica. Stabilita infine l'esenzione da tale pagamento, le condizioni per i SEU appaiono stabili e favorevoli.

Per questo 2015 è possibile prevedere un numero di installazioni sostanzialmente stabile, di circa 150-200 MW all'anno nel segmento residenziale, vista la proroga degli sgravi fiscali. Secondo l'opinione di Tommaso Barbetti, analista della società di consulenza eLeMeNs, è attesa una decisiva crescita nell'adozione della configurazione SEU. La loro realizzazione, almeno per il momento, è da escludersi per soggetti eccessivamente piccoli, presso i quali è difficile applicare economie di scala, ma anche per quelli troppo grandi, perché risultano in pochi. In generale occorrono clienti che spendono molto in energia e presso i quali è possibile far coincidere la curva dei

consumi con quella della produzione fotovoltaica. Ad esempio, situazioni interessanti che possono prestarsi ai SEU sono forniti dai supermercati. Anche gli ospedali possono rappresentare un valida alternativa di applicazione, tuttavia sussiste l'ostacolo dell'utenza, la quale deve essere unica nei SEU, mentre all'interno della struttura ospedaliera possono operare soggetti diversi, come bar, mensa, ecc.

Questa nuova modalità di vendere l'energia permette di realizzare modelli di business utili a praticare il fotovoltaico in *grid parity*. L'unico problema consiste nella fattibilità economica di questo strumento.

Una volta che viene realizzato il progetto, il suo riconoscimento è effettuato dal GSE, il quale deve validare il sistema come SEU. Questa certificazione è rilasciata entro 60 giorni dall'entrata in esercizio e risulta fondamentale per la sua finanziabilità. Il rischio correlato al consumo del cliente è invece nettamente mitigato abbinando la modalità di Scambio sul posto.

Il futuro dei SEU, in un'ottica di lungo termine, è correlato quindi al meccanismo dello Scambio sul posto e all'evoluzione dei sistemi di stoccaggio.

4.1.2 Competitività offerta dai sistemi di accumulo

Senza gli incentivi o il funzionamento di Scambio sul posto, la convenienza a installare piccolo o medi impianti non programmabili dipende fortemente dalla percentuale di elettricità che il produttore è in grado di consumare, invece che immettere in rete. Gli accumuli possono aumentare notevolmente il valore di tale percentuale, rendendo agibile il recupero dell'investimento in tempi ragionevoli.

Queste tesi vengono sostenute dall'Ingegnere Luigi Mazzocchi, il quale è intervenuto all'evento Solarexpo – The Innovation Cloud durante l'incontro relativo al tema “Lo *storage* di elettricità e l'integrazione di rinnovabili e generazione distribuita nel sistema elettrico italiano”. Egli afferma che appare conveniente installare sistemi di accumulo su impianti fotovoltaici già esistenti e incentivati.

In molte regioni d'Italia è già possibile assicurarsi la *grid parity* grazie all'incrocio fra buone condizioni di esposizione solare, alti prezzi del kWh e medi tassi di autoconsumo (anche senza accumuli). Queste aree garantiscono un recupero dell'investimento di nuovi piccoli-medi impianti in meno di 10 anni. Per rendere

pienamente conveniente questa tecnologia in tutto il territorio italiano risulta indispensabile disporre di impianti di accumulo di dimensioni medio-piccole e a prezzi competitivi.

Mediante simulazioni economiche basate sui prezzi attuali presenti sul mercato, si è cercato di stimare il costo e i risparmi derivanti dall'installazione di un piccolo impianto fotovoltaico dotato di un sistema di accumulo che consenta di massimizzarne l'autoconsumo. Grazie alle detrazioni fiscali, il bilancio ottenuto attraverso *business plan* ipotetici appare già attraente. Si parla di tempi di rientro dall'investimento che si aggirano attorno ai 9-10 anni e un tasso interno di 8-10%.

In particolare il sistema di accumulo a batteria permette un importante ritorno economico in quanto, anche nei momenti in cui non è possibile produrre energia da fonti rinnovabili, si ha a disposizione una riserva di energia che permette di non rivolgersi al gestore elettrico. L'energia autoprodotta è infatti gratuita, quindi non viene pagata in bolletta. I costi che si vengono invece a sostenere risultano quelli relativi all'energia consumata durante le ore in cui l'impianto fotovoltaico non produce. In questo modo si diviene a tutti gli effetti dei produttori di energia da fonti rinnovabili e completamente (o quasi) autonomi energeticamente.

L'autoconsumo di energia rinnovabile può essere dunque considerata una sorta di assicurazione contro un non improbabile aumento di prezzo a cui andrà incontro l'elettricità in futuro. Lo sviluppo di questi sistemi in Italia rappresenterebbe un atto di politica industriale non indifferente visto la presenza di notevoli leadership sul nostro territorio, sia sul fronte degli inverter, sia nel settore delle batterie di accumulo. Si renderanno necessarie installazioni qualificate, monitorando i consumi, al fine di dimensionare in maniera ottimale la capacità di stoccaggio energetico per individuare il punto di convergenza tra consumi e accumulo. In questo modo si evita da un lato di investire troppo in una capacità che non viene sfruttata appieno, mentre dall'altro di ottenere un sistema che non funziona al massimo delle sue esigenze. Dinanzi al fotovoltaico si aprono quindi nuove possibilità per il futuro.

4.1.3 L'adozione di batterie di accumulo

Per quanto riguarda le batterie abbinabili ai sistemi fotovoltaici, nuove innovazioni tecnologiche stanno uscendo ora dai laboratori di ricerca per introdursi nei prototipi industriali. Per essi è previsto un calo dei prezzi entro il 2020 dell'ordine del 30-50%. Con il tempo infatti le tecniche si perfezionano, i costi si abbassano e le prestazioni migliorano. Attualmente in commercio esistono numerose soluzioni di batterie, ideali per qualsiasi tipologia di installazione domestica. Esse permettono di ridurre il prelievo dell'energia elettrica dalla rete del gestore competente.

Colui che già possiede un impianto e desidera l'installazione di batterie di accumulo deve sopportare un costo maggiore poiché si va a modificare l'impianto persistente e, nel caso questo sia ammesso ai benefici del Conto Energia, ai fini della corretta erogazione degli incentivi non è consentita alcuna variazioni impiantistica che modifichi i flussi dell'energia prodotta e immessa in rete (come ad esempio la ricarica dei sistemi di accumulo tramite l'energia prelevata). Quindi si rischia di perdere sia l'incentivo statale che le somme già erogate.

Proponiamo qui di seguito una tabella che riassume i costi imputabili a un impianto dotato di batteria e una stima del risparmio economico derivante.

Tipologia impianto FV	Costi e risparmio economico
Impianto residenziale fotovoltaico da 4 KW	Circa euro 8000
Impianto residenziale fotovoltaico da 4 KW con batterie di accumulo	Circa euro 12000
Extraspesa per batterie accumulo	Circa euro 4000
Impianto fotovoltaico da 4 KW privo di batterie di accumulo (percentuale di energia non impiegata da immettere in rete del 30%)	Circa 600 euro di risparmio annuo
Impianto fotovoltaico da 4 KW con batterie di accumulo (percentuale di energia non usata per autoconsumo da immettere in rete del 50-60%)	Circa 800 euro di risparmio annuo Guadagno di 200 euro annui per impianto con batterie rispetto a uno senza Servirebbero 20 anni per ammortizzare l'extraspesa iniziale, ma le batterie attuali durano mediamente 10 anni
<i>Fonte: rielaborazione da stime dell'ing. Riccardo Caliarì della rete Domotecnica</i>	

Per poter operare la scelta della batteria più adatta da abbinare al proprio impianto fotovoltaico occorre calcolare la capacità di consumo che si vuole garantire. Si considera che il fabbisogno energetico medio di una famiglia è pari circa a 3.000 kWh/anno, il quale suddiviso su base giornaliera coincide al consumo di 8,2 kWh/giorno. Tenendo presente che almeno il 50% dei consumi domestici avviene durante le ore serali, è necessario accumulare circa 4 kWh al giorno al fine di ottenere un buon margine di autonomia. Questo valore di stoccaggio risulta sufficiente a ridurre in maniera già significativa le spese contenute in bolletta, essendo riusciti a fare a meno del 50% di prelievi dalla rete. Durante il corso di una tipica giornata, l'impianto consente la produzione di energia per l'immediato consumo diurno e, allo stesso tempo, per il successivo consumo in fase notturna, attraverso il caricamento della batterie disponibili.

Il calcolo del proprio fabbisogno elettrico risulta semplice: occorre moltiplicare i watt assorbiti dagli apparecchi utilizzati per le ore stimate di funzionamento. Si stipula quindi una lista dei dispositivi che hanno bisogno di alimentazione e del loro relativo tempo di funzionamento. Infine si sommano tutti i valori ottenuti per ricavare una stima del consumo energetico giornaliero che si intende soddisfare.


Per comprendere il numero di batterie necessario a coprire il consumo da garantire risulta sufficiente disporre di tre dati:

- I kWh di stoccaggio desiderati;
- I Volt di ogni batteria (in genere coincidono a 12 V);
- Gli Amphere, ovvero la quantità effettiva di elettricità che la batteria è in grado di accumulare.

Moltiplicando gli ultimi due valori di tali parametri si ottiene la potenza in uscita che, combinata all'unità di tempo, diventa il cosiddetto "wattora", o meglio Kilowattora. La misura di quest'ultimo coincide con la quantità di energia elettrica rilevata dai contatori.

Risulta conveniente considerare che, per poter essere impiegate a lungo termine, le batterie non si devono mai completamente scaricare.

Sul tema dello stoccaggio energetico, l'associazione confindustriale delle imprese elettroniche ed elettrotecniche ANIE ha recentemente pubblicato uno studio inerente ai microsistemi di accumulo residenziali e commerciali. All'interno di esso si delinea uno scenario ipotetico, caratterizzato da una stima ottimistica di diffusione di questi componenti del 20% su 25 milioni di famiglie in Italia, ovvero 5 milioni di impianti solari dotati di batterie. In questa situazione si garantirebbero risparmi di oltre 500 milioni di euro all'anno. Il bilancio effettuato sul singolo utente finale porterebbe un ulteriore beneficio di circa 150 € nel caso di impianto esistente e incentivato e 170 € in caso di un nuovo impianto.

Zone considerate		Configurazioni considerate	
		A Impianto fotovoltaico nuovo non incentivato	B Impianto fotovoltaico esistente e incentivato
	Zona Nord	*Bilancio anno: 166,7 €	*Bilancio anno: 146,8 €
	Zona Centro	*Bilancio anno: 171,2 €	*Bilancio anno: 150,1 €
	Zona Sud	*Bilancio anno: 169,0 €	*Bilancio anno: 155,1 €

Fonte: Studio ANIE

ANIE ipotizza le seguenti proposte normative per favorire la diffusione delle batterie di accumulo:

- Un nuovo Conto Energia per incoraggiarne lo sviluppo;
- L'estensione del bonus fiscale del 50% destinato alle ristrutturazioni edilizie e risparmio energetico.

Attualmente gli impianti residenziali che appaiono più efficienti corrispondono a quelli che lavorano per l'autoconsumo e sfruttano il meccanismo dello Scambio sul posto.

4.2 Calcolo del Rendimento Fotovoltaico

Con il termine "rendimento fotovoltaico" si fa riferimento alla resa complessiva di un impianto, il quale dipende prevalentemente dall'efficienza energetica dei pannelli fotovoltaici installati. Questi sono in grado di convertire l'energia solare in elettrica in

percentuali diverse a seconda di diversi fattori, quali il rendimento dei materiali, la tolleranza dei dati di fabbricazione rispetto alle specifiche indicate sui dati di targa, l'irraggiamento incidente (dovuto alla dislocazione geografica o all'orientamento e la temperatura ambientale).

I pannelli caratterizzati da alta efficienza corrispondono a quelli che permettono, a parità di superficie, la maggior produzione di energia elettrica. Per ultimo di deve in ogni caso considerare la resa complessiva dell'intero impianto fotovoltaico.

Per il calcolo del rendimento del proprio impianto è possibile utilizzare un software di simulazione messo a disposizione dall'Unione Europea , il quale permette di inserire i parametri fondamentali per impianti localizzati, in base a latitudine e longitudine, in Europa e Africa. Naturalmente occorre conoscere i dati di riferimento del proprio impianto in modo da non commettere stime errate. La previsione del simulatore risulta attendibile ed è correlata dalla relativa spiegazione delle scelte di metodo di calcolo adottate.

CAPITOLO IV - PROCESSI DI TRATTAMENTO DEI PANNELLI FOTOVOLTAICI DISMESSI

Gestione dei rifiuti, riciclaggio e recupero di materia

1. Gerarchia di gestione dei rifiuti

A livello politico e istituzionale le normative emanate dall'Unione Europea si prefiggono una serie di obiettivi ambientali. Innanzitutto si ricerca una riduzione nei consumi energetici e delle materie prime all'interno delle attività manifatturiere/commerciali realizzate dall'uomo. Già in questo ambito si rende indispensabile l'intervento delle operazioni di riciclo, constatando che l'Europa è caratterizzata prevalentemente da territori poveri di materiale rinnovabili. L'implementazione di un ciclo chiuso nella attività umane, tramite riciclaggio dei rifiuti, appare dunque una prospettiva interessante dal punto di vista sia ambientale che economico. Inoltre si è cominciato a favorire la produzione di energia ricavabile da fonti alternative e in grado di rigenerarsi. In generale, le normative europee intendono garantire per il 2020 il riciclo del 50% dei rifiuti urbani (provenienti dai nostri ambienti domestici o da piccole attività) e il 70% dei rifiuti da costruzione e demolizione (materiali inerti).

Al fine di opporsi alla crescente produzione di rifiuti, l'Unione Europea propone dunque un quadro giuridico volto a controllare l'intero ciclo dei rifiuti, dalla loro produzione allo smaltimento, ponendo in evidenza i processi di recupero e riciclaggio. In tale senso emana la direttiva 2008/98/CE, entrata in vigore il 12 dicembre del 2008, la quale mira a proteggere l'ambiente e la salute umana attraverso la prevenzione della produzione e della gestione dei prodotti a fine vita. Nello specifico gli Stati membri devono adottare misure adeguate per il trattamento dei rifiuti generati. Tali interventi

devono essere conformi a una gerarchia, la quale specifica l'ordine di priorità nella loro adozione. Le modalità di intervento sono presentate nei seguenti punti:

- **Progettare (*Rethink & Redesign*)**

Per poter adottare un approccio rivolto alla prevenzione risulta fondamentale riprogettare il prodotto sul piano produttivo, tenendo presente gli aspetti relativi alla sua dismissione e a un suo eventuale riutilizzo. A livello europeo questo intervento costituisce la strategia prioritaria da applicare a monte dei processi.

Oggigiorno si stanno realizzando beni con cicli di vita sempre più compressi e per questo motivo appare fondamentale mettere in atto una progettazione che adotti una prospettiva rivolta al fine vita dei prodotti, in modo da facilitarne lo smontaggio e il recupero dei componenti.

- **Riduzione nella produzione dei rifiuti (*Reduce*)**

Questa tipologia di contributo viene a dipendere dalle politiche di gestione della comunità. A livello industriale è possibile intervenire mediante il miglioramento dell'efficienza nei processi di trasformazione e nell'utilizzo degli imballaggi. Le aziende sono quindi sollecitate a ricercare una riduzione del consumo di materia prima e degli scarti di produzione nei cicli produttivi da loro realizzati.

- **Riuso (*Reuse*)**

Secondo quest'ottica un oggetto che sta per divenire rifiuto può essere rimesso a nuovo per riprendere ad adempiere la sua funzione precedente. In questo senso si possono promuovere degli interventi a livello comunitario.

- **Riciclo o Recupero (*Recycle/Recovery*)**

Il trattamento di riciclaggio, a cui sono soggetti i materiali, permette di ottenere materia prima-seconda, la quale può essere reinserita all'interno di un ciclo di attività industriale. A differenza del riuso, mediante il procedimento di riciclaggio si ottengono prodotti che assolveranno una funzione diversa dalla precedente.

La frazione di materiale che non è possibile riciclare viene valorizzata tramite recupero energetico all'interno di inceneritori.

- **Discarica (*Dispose*)**

Lo stoccaggio dei rifiuti rappresenta l'ultima soluzione da optare per lo smaltimento finale dei prodotti e deve essere eseguita in condizioni tali da garantire la sicurezza dell'ambiente e della salute umana. Questa opzione risulta la meno desiderabile perché non permette la riduzione dell'impatto ambientale. Le discariche infatti occupano frazioni di territorio in maniera irreversibile e, all'interno di esse, viene depositato potenziale materia prima-seconda non più recuperabile. Si auspica quindi che, con il tempo, il loro utilizzo sia destinato a scomparire del tutto. Molti Paesi Europei sono già riusciti nel proposito di raggiungimento dell'obiettivo "discarica zero".

Questa politica di gestione gerarchica dei rifiuti può essere visualizzata tramite l'immagine di una piramide rovesciata, poiché si prospetta che i quantitativi di rifiuti trattati da ciascuna delle modalità descritte vengano a ridursi man mano che si procede con l'elencazione dei punti.



Le autorità competenti sono quindi tenute a disporre di uno o più piani di gestione dei rifiuti, volti a coprire l'intero territorio geografico del Paese membro interessato. Tali piani devono comprendere il tipo di rifiuto, la quantità, la fonte, i sistemi di raccolta esistenti e i criteri presi come riferimento.

Ogni produttore o altro detentore di rifiuti deve provvedere personalmente al loro trattamento o, in alternativa, consegnarli a un ente apposito. I Paesi membri possono contribuire nella collaborazione reciproca, al fine di creare una rete di impianti per lo smaltimento dei rifiuti. In questo modo è possibile garantire l'indipendenza

dell'Unione Europea in materia di trattamento rifiuti. Le nozioni relative al riciclo e recupero devono inoltre essere chiarite e incoraggiate, in modo da attuare le attività di prevenzione e tutela ambientale finalizzate alla perseverazione delle risorse naturali. Con il tempo si auspica che i rifiuti vengano sempre più considerati nella mentalità comune come una potenziale risorsa e materia ancora sfruttabile, e non più un prodotto da scartare.

1.1 Smaltimento previsto per i RAEE

Come già specificato nei capitoli precedenti, i RAEE consistono in quella categoria di rifiuti alla quale appartengono le apparecchiature elettriche ed elettroniche, che il possessore intende disfarsi in quanto guaste od obsolete. Il tasso di crescita a livello globale di questo tipo di rifiuti appare il più elevato rispetto alle altre categorie e pari a 3,5% all'anno. I dispositivi elettronici, infatti, vanno incontro a cicli di vita sempre più ristretti e sono soggetti a continue innovazioni tecnologiche, le quali inducono i consumatori a effettuare periodicamente nuovi acquisti. Le soluzioni attuate per il loro smantellamento prevedevano nella maggior parte dei casi il deposito in discarica o il recupero energetico negli inceneritori, senza applicare alcun pretrattamento sul rifiuto, provocando inquinamento sia nelle falde acquifere del sottosuolo che in atmosfera.

Non solo questa tipologia di prodotti può contare la presenza di sostanze nocive e non biodegradabili all'interno dei loro componenti, ma ha determinato un allarmante fenomeno di esportazioni illegali dei loro rifiuti verso paesi poveri ed emergenti, nei quali la manodopera risulta a basso costo e il loro trattamento viene effettuato in condizioni prive di ogni misura di sicurezza. Molto spesso accade che, attirati dalla presenza di materiali di valore nella composizione dei dispositivi (come oro e rame), i rifiuti vengano bruciati da soggetti non autorizzati per l'estrazione di tali metalli preziosi. Le tossine contenute vengono quindi sprigionate in aria, provocando grave ripercussioni sull'ambiente circostante e la salute umana. Spesso la gestione inadeguata di queste apparecchiature viene inoltre effettuata da operatori casalinghi e inefficienti, senza alcuna verifica o controllo, registrando anche casi di sfruttamento

del lavoro minorile. In conclusione le problematiche relative a questa tipologia di rifiuti non coinvolgono solamente l'aspetto ambientale, ma anche l'ambito etico.

Queste problematiche erano state opportunamente esposte all'interno del Rapporto del Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP), il quale evidenziava la necessità di un opportuno piano regolatore per lo smaltimento dei rifiuti. Gli Stati membri erano quindi invitati a provvedere a tale situazione mediante l'adozione di normative specifiche, mirate alla raccolta e corretta gestione dei rifiuti. La prima direttiva, risalente al 2003, era stata promulgata con procedure d'urgenza e illustrava le tipologie di apparecchi appartenenti alla categoria di rifiuti elettronici e la loro corretta gestione prevista. Nel corso della modifica normativa, apportata nel 2012, i pannelli fotovoltaici entrano a far parte della classificazione RAEE.

Prima della regolamentazione normativa la crescente diffusione di apparecchi elettronici ha dunque comportato un sempre maggior rischio di abbandono nell'ambiente e in discarica o l'invio ai termovalorizzatori (inceneritori) con conseguente inquinamento del suolo, dell'aria e dell'acqua, il quale si ripercuote sulla salute umana. In base alle problematiche sopracitate, questi prodotti devono essere opportunamente trattati e destinati al recupero differenziato dei materiali di cui sono composti (come rame, ferro, alluminio, vetro, argento, piombo) evitando in questo modo di determinare uno spreco di risorse che possono essere riutilizzate nella costruzione di nuove apparecchiature.

Secondo quanto indicato dalla normativa, occorre prevedere per i rifiuti RAEE un trattamento svolto in centri adeguatamente attrezzati e autorizzati alla loro gestione, i quali devono sfruttare le migliori tecniche a disposizione. Le attività richieste per il loro smaltimento includono indicativamente diverse fasi: messa in sicurezza e asportazione dei componenti pericolosi, smontaggio e separazione preliminare dei materiali e, infine, la lavorazione meccanica finalizzata al recupero dei materiali. Per garantire la consegna dei RAEE ai centri di trattamento è necessario predisporre una raccolta differenziata di tale apparecchiature. Attualmente i cittadini possono conferire

i propri rifiuti in isole ecologiche⁷ o riconsegnare gratuitamente il rifiuto al rivenditore, all'atto dell'acquisto di un apparecchiatura della medesima tipologia.

Per adempiere al principio “Chi inquina paga” riportato nella direttiva, il finanziamento e l'organizzazione della raccolta sono posti in capo ai produttori degli apparecchi elettrici ed elettronici. A essi è consentito far spendere un eco-contributo⁸ all'acquisto di un dispositivo nuovo. Ai sensi del decreto i produttori corrispondono a tutti coloro che fabbricano o importano un prodotto elettronico, oppure lo commercializzano con il proprio marchio, indipendentemente dalla provenienza geografica del bene. In conclusione rappresentano i soggetti che immettono per primi il prodotto sul mercato, divenendone così responsabili.

Per dimostrarsi capaci ad adempiere a tutte le normative previste nel decreto, i fabbricanti delle apparecchiature hanno costituito Sistemi Collettivi, tipicamente in forma di consorzi volontari, in funzione del tipo di dispositivo o mercato servito. Tali sistemi possono disporre di impianti per il trattamento di diretta proprietà, in cui convogliare i RAEE di pertinenza dei propri associati, oppure operare come semplici “intermediari”, avvalendosi di impianti terzi.

La raccolta e il convogliamento dei RAEE possono quindi essere gestiti sia da Enti locali, i quali predispongono aree apposite, sia da Sistemi Collettivi, i quali possono occuparsi dei rifiuti industriali oltre a quelli urbani

Un volta dismessa, l'apparecchiatura può essere riciclata in tre modi:

1. **Riutilizzo del dispositivo**, nel caso in cui risulti ancora funzionante e sia possibile prolungarne il ciclo di vita, posticipandone il processo di trattamento vero e proprio;
2. **Riutilizzo dei componenti** perfettamente funzionanti;
3. **Recupero e riciclo dei materiali**, offrendo la possibilità ai materiali contenuti di essere reimpiegati come materia prima-seconda nel ciclo produttivo di altri beni.

⁷ Le stazioni ecologiche corrispondono ad aree a servizio di più comuni o di una grande città, nelle quali il cittadino può consegnare rifiuti pericolosi, ingombranti o provenienti da scarti vegetali.

⁸ L'eco-contributo coincide con un sovrapprezzo previsto dalla Legge, il quale serve a finanziare le attività di trattamento e riciclo degli apparecchi elettrici ed elettronici. La sua finalità risulta esclusivamente ambientale e dunque non costituisce un elemento di guadagno né per i produttori né per i punti vendita. Esso è direttamente applicato al prodotto venduto.

L'intero processo di gestione e riciclo dei rifiuti RAEE conta di una serie di fasi:

- Ricevimento e raccolta, le cui attività devono essere eseguite in modo tale da garantire l'integrità del bene dismesso durante il trasporto;
- Pretrattamento e messa in sicurezza per la rimozione di parti mobili ed eventuali materiali pericolosi;
- Smontaggio e recupero dei componenti, che vengono eseguiti prevalentemente tramite operazioni manuali, finalizzate a facilitare i processi di recupero e riutilizzo;
- Frantumazione e selezione materiali, i quali costituiscono uno stadio ad elevata automatizzazione che si conclude con l'invio del materiale al recupero;
- Recupero di materiale ed energia, durante il quale i materiali selezionati vengono reintrodotti nei cicli produttivi e, nel caso in cui non sia possibile questa opzione, è prevista la valorizzazione energetica mediante inceneritori;
- Smaltimento, a cui è destinato quella frazione di rifiuti di cui non è possibile né il riutilizzo né l'invio al termovalorizzatore.

Risulta fondamentale sottolineare che tutte le fasi di gestione dei RAEE sono svolte e controllate da operatori specificamente autorizzati allo svolgimento delle operazioni previste per ciascuna.

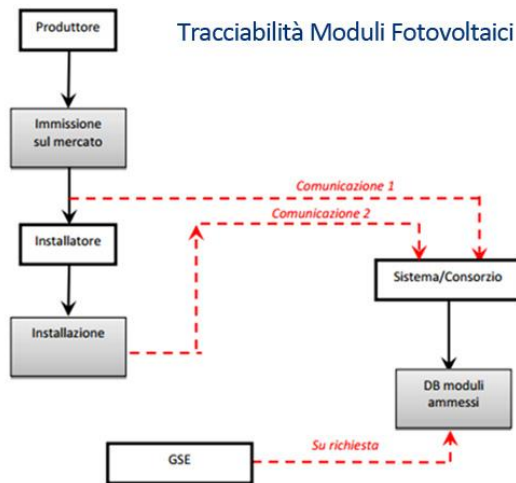
2. Trattamento dei moduli fotovoltaici dismessi

La continua espansione del segmento delle energie rinnovabili è stata strettamente accompagnata da leggi e ambienti normativi sempre più definiti. Oltre ai criteri di progettazione e costruzione degli impianti è bene tenere in considerazione il futuro di queste strutture, che comprende lo smaltimento a fine vita. Per quanto possa apparire distante, costituisce un problema da considerare sin da adesso. La vita utile dei moduli fotovoltaici, entro il quale sono in grado di produrre le migliori prestazioni di produzione energetica, è compresa tra 20 e 25 anni. Questa valutazione ci obbliga a considerare gli scenari dei prossimi decenni e pianificare le azioni necessarie.

Il primo passo importante dal punto di vista normativo è avvenuto con il recepimento della Direttiva 2012/19/UE, la quale ha inserito i pannelli fotovoltaici sotto la dicitura “Disciplina dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche”. In particolare l’articolo n. 40 riporta che *“per la gestione dei rifiuti prodotti dai pannelli fotovoltaici che beneficiano dei meccanismi incentivanti dei primi tre Conto Energia e di parte del Quarto, al fine di garantire il finanziamento delle operazioni di raccolta, trasporto trattamento adeguato, recupero e smaltimento ambientalmente compatibile, il GSE trattiene dei meccanismi incentivanti negli ultimi anni di diritto all’incentivo una quota finalizzata a garantire la copertura dei costi di gestione dei predetti rifiuti”*.

In Italia, dal 1° luglio 2012, per l’accesso alle tariffe incentivanti previsti dai Conto Energia era necessario che il soggetto responsabile trasmettesse al GSE (Gestore dei Servizi Energetici) un attestato di adesione del produttore a un sistema o consorzio che ne garantisse la completa gestione a fine vita. L’ultimo decreto ribadisce tale necessità, imponendo che tutti i produttori di pannelli fotovoltaici debbano essere in possesso di un’attestazione rilasciata dai Sistemi Collettivi o Consorzi di riciclo. Nel caso i prodotti siano di importazione, l’adesione può essere adempiuta dal distributore stesso. Il termine ultimo entro cui i produttori e gli importatori di moduli dovevano provvedere a iscriversi a un apposito consorzio era fissato al 31 marzo 2013. Il decreto, quindi, si rivolge soprattutto ai produttori, i quali devono rispettare gli adempimenti stabiliti al suo interno e tenere presente la loro responsabilità nel prevedere il trattamento a scopo di riciclaggio dei loro prodotti giunti a fine vita.

Le regole applicative dei decreti sono poi state ampliate e integrate dal GSE, mediante un proprio Disciplinare tecnico, pubblicato il 21 dicembre 2012. La finalità di interesse pubblico coincide con l’intenzione di assicurare il recupero e riciclo del singolo modulo fotovoltaico che ha esaurito il suo ciclo di vita, di cui si intende “tracciare” il percorso dal momento di immissione sul mercato italiano sino allo smaltimento.



Al pari delle altre categorie di rifiuti elettrici ed elettronici, i pannelli solari devono essere adeguatamente trattati per la separazione e il riciclaggio dei singoli componenti. Dal momento in cui viene installato un impianto fotovoltaico il titolare non deve preoccuparsi delle spese relative al suo futuro smaltimento, perché esse risultano già incluse nel prezzo di fornitura. Per legge, infatti, tali costi sono sostenuti direttamente all’acquisto dei moduli e degli appositi inverter. I produttori e i distributori sono tenuti invece ad aderire obbligatoriamente a uno dei consorzi che dovrà in futuro occuparsi del riciclo dei componenti presenti nell’impianto fotovoltaico dismesso. Tre risultano gli argomenti fondamentali riguardanti lo smaltimento di un pannello:

- Trascorsi 25-30 anni di funzionamento, l’impianto non produce un rifiuto “comune” e quindi deve subire specifici processi di trattamento e riciclaggio;
- Le spese derivanti dal trattamento dei pannelli risultano già saldate all’atto dell’acquisto (il titolare dovrà solo impegnarsi a chiamare l’apposito consorzio che provvederà al ritiro, al trasporto e allo smaltimento dei moduli);
- I Consorzi che si prendono in carico lo smaltimento dei pannelli sull’intero territorio nazionale devono essere certificati e, mentre gli Enti Locali si occupano della raccolta nelle proprie piattaforme comunali, i sistemi attingono da esse per il trasporto dei rifiuti nei centri di trattamento.

Il processo di smaltimento prevede molti passaggi, i quali partono dalla raccolta fino alla fase di smontaggio e riciclo vero e proprio dei singoli elementi. I costi relativi a tutte le operazioni necessarie al trattamento possono incidere sensibilmente sulle spese delle imprese. Anche se risulta difficile individuare una cifra specifica, è possibile

affermare che il prezzo medio per il trattamento dei pannelli solari si aggira approssimativamente attorno ai 250 €/tonnellata. Da questo si può dedurre che lo smaltimento di un impianto domestico da 3 kWp, composto da 15 moduli e caratterizzato da un peso complessivo di 270 kg, determina un costo di circa 70 €. Ogni impianto richiede in ogni caso una valutazione specifica per poter stabilire l'intervallo di spesa coerente.

2.1 Necessità e vantaggi derivabili dal trattamento dei moduli

Negli ultimi anni, fra le tematiche più discusse nell'ambito delle energie rinnovabili, è emersa la questione del recupero e del riciclo dei pannelli solari. Infatti il fotovoltaico opportunamente trattato a fine vita può portare un grande beneficio. Esso diviene sorgente di materie prime-seconde, sfruttabili in nuovi prodotti, e allo stesso tempo riduce le emissioni di CO₂ nell'aria e il consumo energetico.

In termini di funzionamento, la durata media di un modulo è stimabile a 25 anni, trascorsi i quali la diminuzione delle prestazioni è tale da rendere necessaria la sostituzione e lo smaltimento del pannello. La quantità dei rifiuti generati risulta proporzionale alla crescita della potenza fotovoltaica installata. Le recenti stime in letteratura scientifica indicano un valore di circa 80 kg per ogni kW realizzato. Sulla base di questa equivalenza e assumendo un intervallo di funzionamento di 25 anni, è stato possibile identificare la quantità cumulata di rifiuti fotovoltaici che l'Italia si ritroverà a dover gestire nei prossimi anni.

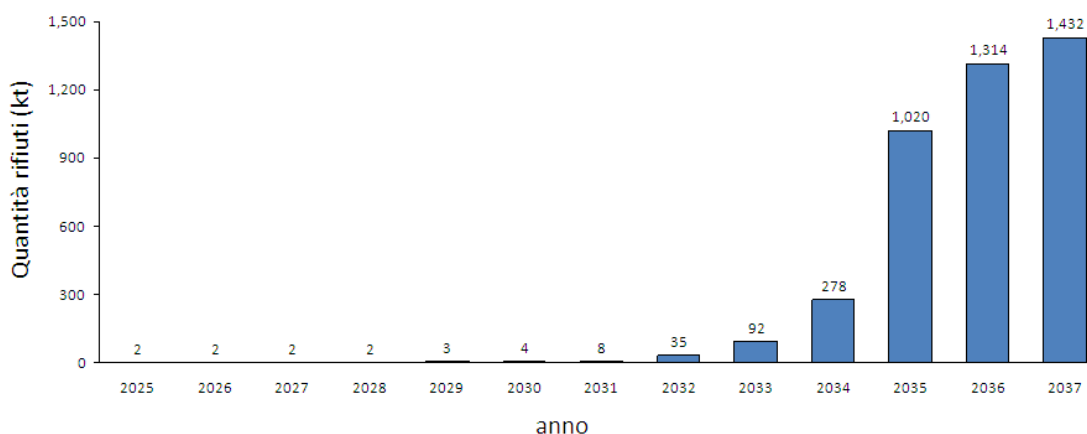


Grafico illustrante l'andamento previsto per il quantitativo di rifiuti in Italia

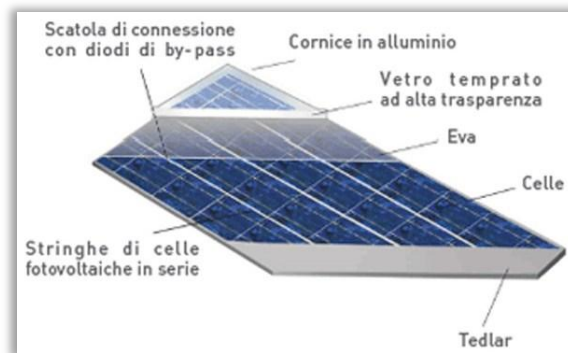
Siccome la principale espansione della base fotovoltaica installata è avvenuta tra il 2010 e il 2012 si può desumere che il problema dei rifiuti derivabili si avverterà solo tra molti anni, attorno al 2035, quando la quantità cumulata avrà raggiunto quasi 1,5 milioni di tonnellate. Osservando la provenienza geografica, solamente meno del 10% del totale installato risulta di produzione nazionale, mentre il 50% corrisponde a modelli europei e la parte restante cinese.

Sulla base di questi dati si può ragionevolmente desumere l'importanza di predisporre per i pannelli esauriti opportuni processi di riciclo, tali da non provocare danni all'ambiente. Infatti, nel caso si prevedesse il loro deposito in discarica le sostanze pericolose in essi contenute rischierebbero di infiltrarsi nelle falde acquifere sotterranee (provocando la loro contaminazione), mentre se venisse contemplato come soluzione l'inceneritore si provocherebbe uno sprigionamento in atmosfera di fumi e polveri tossiche. Per ovviare a tali fattori di inquinamento recenti studi si sono focalizzati sulla modalità di recupero e riciclo dei rifiuti fotovoltaici, in modo che possano costituire materiali utili anche quando concludono il loro ciclo di vita.

Essenzialmente un modulo è composto dal 80-90% di vetro, dal 10% di plastica o metalli e da una bassa percentuale di semiconduttori. Ognuno di questi elementi risulta riciclabile da un minimo del 60% (come argento, gallio, ecc.) fino ad un massimo del 100% (ad esempio l'alluminio). Nel suo complesso un pannello solare individua quindi la presenza di varie tipologie di componenti, ciascuno dei quali necessita di una differente opera di bonifica e smaltimento. In base a tale valutazione, appare necessario applicare al pannello un processo preventivo di separazione di ogni categoria di materiale. Tutti i componenti ricavabili possono risultare molto utili anche nel momento in cui diventano rifiuti. Infatti il loro ciclo di vita non coincide con quello dei dispositivi fotovoltaici nei quali sono incorporati e pertanto, se riciclati in modo opportuno, sono riutilizzabili per la realizzazione di nuovi moduli o altri prodotti.

Per poter valutare l'impatto relativo allo smaltimento dei pannelli risulta conveniente considerare la struttura dei singoli prodotti, la quale è costituita da più strati di materiale diverso. Solitamente un pannello fotovoltaico incorpora un vetro temperato, molto robusto e in grado di sostenere urti e pressioni elevate. Lo strato successivo è invece occupato dalle singole celle fotovoltaiche, abbinate a due substrati di materiali

sintetico identificato come EVA (Etilene Vinil-Acetano). Le celle e il composto EVA sono legati al vetro tramite un processo di laminazione, necessario ad assicurare un'elevata protezione alla componentistica elettrica. In aggiunta è presente un livello costituito da una pellicola di PVF (Poly Vinyl Fluoride), il quale opera una congiunzione con la precedente struttura EVA e garantisce una forte resistenza all'invecchiamento. Il pannello risulta completato mediante l'inserimento di una cornice in metallo e la scatola di giunzione con i relativi cavi.



Stratificazione di materiali interna al pannello solare

Come abbiamo appena illustrato, ogni modulo comprende differenti tipi di materiali, aggregati fra loro attraverso diversi processi di lavorazione. Di conseguenza, prima di essere inviato allo smaltimento, il pannello deve essere disassemblato nei suoi diversi componenti. La parte vetrosa atta a proteggere il modulo può essere sganciata dalle celle, mentre il profilo metallico deve essere tagliato e rimosso, avendo cura di eliminare tutte le guarnizioni in mastice precedentemente applicate. I cavi e la scatola di giunzione sono asportati in modo tale da poter essere reimpiegati all'interno dei processi lavorativi. Per lo strato di EVA sono previsti trattamenti specifici, che seguono criteri analoghi a quelli dei pannelli in plastica resistenti ai liquidi.

Lo smaltimento del silicio viene assimilato a quello dei circuiti elettronici presenti in altri dispositivi, quali personal computer. Questo materiale possiede il vantaggio di non subire con il tempo la diminuzione della propria capacità ricettiva dell'irraggiamento luminoso. Le cause del decadimento nelle prestazioni di un modulo fotovoltaico sono invece da attribuirsi all'usura dei componenti elettronici e nell'ossidazione dei contatti. Per questo motivo i pannelli possono essere riciclati e resi nuovamente operativi da aziende specializzate. Nonostante la maggior parte dei componenti utilizzati sia costituito da materiale inerte, in alcune generazioni di

pannelli fotovoltaici individuiamo la presenza di sostanze pericolose (come tellururo di cadmio), per le quali risulta necessario avviare specifiche procedure tramite partner qualificati.

Per quello che riguarda i moduli cristallini è dunque possibile operare il riciclaggio del silicio, mentre per gli altri elementi è previsto un percorso dedicato da seguire, come accade per l'alluminio e il vetro (che viene nuovamente fuso). Il rame presente nei cablaggi può essere recuperato in modo tale da essere inserito nel ciclo delle materie prime-secondo. I moduli a film sottile non contengono invece elevati componenti di silicio e da questi risulta quindi unicamente possibile recuperare i supporti metallici e il rame mediante processi di separazione.

Per il momento non sono stati riscontrati evidenze di danni alla salute derivanti dai pannelli giunti a fine vita e numerosi test li hanno classificati come rifiuti non nocivi. I moduli fotovoltaici vengono realizzati con le più diffuse tecnologie di costruzione e le frazioni di materiali ricavabili da un corretto processo di riciclo appaiono molto interessanti. Considerando un modulo di 22,4 kg, esso contiene approssimativamente 17 kg di vetro, 2,5 kg di alluminio e altri quantitativi di rame e argento. È possibile quindi osservare che i moduli sono composti da materiali ad alto valore, i quali possono essere rilavorati e riutilizzati per creare nuovi prodotti e materie prime, ottenendo indubbi vantaggi economici. Il vetro ricavati dai pannelli viene miscelato con scarti di altra provenienza ed essere in questo modo impiegato in fibre di vetro, prodotti per l'isolamento o imballi. I metalli, il silicio e la plastica possono invece essere riutilizzati per la produzione di nuove materie prime.

Nonostante l'esistenza di differenti tipologie costruttive, i pannelli fotovoltaici sono dunque assemblati ricorrendo a materie prime potenzialmente riutilizzabili nel ciclo produttivo. Per questa ragione appare fondamentale che i moduli vengano correttamente smaltiti mediante idonei sistemi di tracciabilità e l'invio dei materiali di cui sono composti alle distinte filiere di riciclo. Grazie alle innovazioni tecnologiche verificatosi negli ultimi anni, sono recuperabili fino al 95% dei vari materiali semiconduttori o vetro, così come vaste quantità di metalli ferrosi e non ferrosi. In ogni caso non tutto può risultare economicamente vantaggioso, come ad esempio il vetro, il quale richiede maggiori costi di lavorazione.

Occorre porre in evidenza come la carenza di disponibilità di alcune sostanze può limitare la crescita del settore e provocarne l'aumento dei prezzi. Nello scenario italiano solo il 2% di silicio risulta di produzione italiana, mentre la percentuale rimanente è di importazione dai grandi produttori internazionali. Anche in questa situazione l'applicazione del riciclaggio ai pannelli esausti può costituire un forte supporto, favorendo lo sviluppo economico del mercato fotovoltaico e garantendo il mantenimento dei costi a un livello contenuto. Oltre al silicio, vetro e alluminio, infatti, permette anche il recupero di elementi a rischio esaurimento a causa della loro richiesta esponenziale, come indio, gallio e selenide. Al termine del suo ciclo di vita il fotovoltaico è dunque in grado di restituire all'ambiente materie utili e preziose.

Si è già compreso che qualsiasi sistema di riciclaggio sviluppato deve essere in grado di trattare una vasta gamma di componenti diversi. A tale scopo è necessario integrare il riciclaggio nella realizzazione delle future tipologie di pannelli. A titolo d'esempio, sta iniziando a diffondersi l'impiego di moduli privi di cornice, i quali eliminano la presenza del telaio in alluminio previsto nei modelli precedenti.

Anche se attualmente il riciclaggio appare ancora un'attività di ardua praticabilità, in futuro diverrà una vera e propria necessità a causa dell'enorme flusso di rifiuti che sarà generato. Nel corso del tempo verranno quindi individuati standard di riciclaggio sempre più elevati, con servizi offerti da enti certificati e controllati. La progettazione e produzione di moduli fotovoltaici più facilmente smaltibili risulta già ora incentivata dalla responsabilità che il produttore deve dimostrare verso l'impatto dell'intero ciclo di vita dei suoi prodotti. Alcuni osservatori ritengono che il riciclaggio dei moduli risulti già oggi un processo economicamente e tecnicamente fattibile.

Con il tempo sono nati diversi organi che operano la valutazione dell'impatto e dei costi legati allo smaltimento dei pannelli e permettono l'aggregazione delle aziende produttrici. Fra questi spicca il consorzio no-profit PV Cycle, il quale, attraverso il rispetto delle normative europee vigenti, si impegna a sostenere uno sviluppo sostenibile e "doppiamente verde" del fotovoltaico. L'obiettivo perseguito coincide con la volontà di assicurare un corretto processo di smaltimento dei moduli tramite un percorso economicamente interessante e facilmente attuabile. A livello italiano sta

svolgendo un'operazione di formazione delle aziende, esponendo il processo di recupero e articolando il sistema di raccolta.

I principali produttori, importatori e rivenditori si sono quindi riuniti in varie associazioni e centri di ricerca del settore fotovoltaico e, mediante l'appoggio di PV Cycle, si impegnano a introdurre una gestione complessiva dei rifiuti realizzata con una politica di ritiro e riciclaggio volontario.

2.2 Soluzioni di riciclaggio più comuni

Attualmente i processi impiegati per il recupero dei moduli fotovoltaici sono molteplici e in corso di definizione. Sostanzialmente è possibile distinguere i procedimenti perseguibili in due macro aree:

- **Soluzioni a basso valore**, le quali si concentrano sul riciclo di alcuni componenti della distinta base del modulo (come la copertura in vetro e la cornice in alluminio);
- **Soluzioni ad alto valore**, le quali ricercano la valorizzazione massima di tutti i rifiuti racchiusi in un impianto, compresi quelli di maggior pregio in esso presenti (quali il silicio nei moduli cristallini, i semiconduttori impiegati nei pannelli a film sottile e l'argento).

In ogni caso tutti i sistemi di riciclaggio presenti in commercio devono essere in grado di soddisfare i seguenti requisiti: elasticità nella previsione dei quantitativi di rifiuti da trattare (ovvero la capacità di gestire sia le attuali piccole quantità generate sia quelle elevate che verranno prodotte nell'immediato futuro), implementazione della tecnologia di riciclaggio nel pieno rispetto della sostenibilità ambientale ed economica, combinando gli obiettivi di costo con la necessità di limitare l'impatto provocato dalle stesse attività di trattamento, e standardizzazione dei processi, al fine di passare dalla scala di laboratorio a quella commerciale.

Momentaneamente non si è certi sui vantaggi ottenibili dal mercato del riciclo dei moduli. Il problema non risiede nella mancanza di sistemi efficienti, ma sul quantitativo non ancora elevato di rifiuti fotovoltaici (almeno in Italia) in grado di far lavorare a pieno regime gli impianti. Per ora la maggior parte dei pannelli raccolti

proviene da Germania e Spagna, ma la nostra nazione è destinata a divenire protagonista del settore attorno al 2035, quando si troverà dinanzi a un quantitativo enorme di rifiuti da dover gestire, il cui valore è stimato a più un milione di tonnellate. Quindi, se il mercato fotovoltaico è destinato a espandersi come negli ultimi anni e continua a incrementarsi la domanda per il recupero e riciclo dei pannelli, le possibilità di guadagno delle due filiere risulterebbero notevoli.

Secondo la legge sono i produttori e importatori dei moduli a doversi occupare della gestione a fine vita dei prodotti che immettono sul mercato, attraverso l'adesione a un consorzio dotato di un'adeguata struttura operativa e finanziaria. La maggior fetta di mercato di riciclo prenderà avvio solo tra alcuni anni, tuttavia con i prezzi e le efficienze dei moduli attualmente in vendita risulta già vantaggioso effettuare il "repowering" degli impianti, ovvero la sostituzione dei vecchi moduli con quelli di ultima generazione, capaci di offrire prestazioni migliori. Può risultare quindi già necessario garantire il corretto smaltimento dei pannelli, recuperando e rimettendo nel ciclo di produzione tutti i materiali di cui sono composti.

Per il trattamento e riciclo dei moduli è necessario innanzitutto separare le singole parti che vanno a costituire il *sandwich*: l'alluminio della cornice, il vetro che protegge i pannelli sul lato superiore, il rame presente nei collegamenti tra le celle, il silicio e i metalli, quali argento, che compongono i moduli solari. I processi di separazione dei singoli componenti possono essere di tipo termico o meccanico.

Il riciclaggio di materiali provenienti dal recupero di pannelli fotovoltaici che hanno esaurito il loro ciclo di vita diverrà sempre più una fonte di risorse. Il processo permette infatti di ricavare da un modulo cristallino quasi il 98% dei materiali di cui è composto, nel dettaglio:

- 15 kg di vetro (proveniente dal rivestimento del modulo e di altissima qualità);
- 2,8 kg di plastica (ottenuta dal supporto e riciclata in vasi o altro);
- 2 kg di alluminio (dalla cornice);
- 1 kg di polvere di silicio (contenuto all'interno delle celle fotovoltaiche);
- 0,14 kg di rame (presente nelle connessioni elettriche tra celle).

Diverse possono essere i procedimenti di riciclo atti a garantire il recupero di tutti questi elementi e il loro riutilizzo. Ad oggi i processi tecnologici impiegati non sono definiti né tantomeno univoci. In generale il trattamento di un modulo si caratterizza di tre fasi essenziali:

1. Rimozione cornice e scatola di giunzione;
2. Triturazione;
3. Operazioni di trattamento e separazione dei materiali nelle linee esistenti di riciclaggio del vetro e semiconduttori.

Alcune aziende private e organizzazioni no-profit, come PV Cycle nell'Unione Europea, si stanno impegnando nel potenziamento delle operazioni di raccolta e riciclaggio dei moduli a fine vita. In base alla tipologia di costruzione di cui si caratterizzano i pannelli, è possibile individuare due soluzioni di trattamento più comuni.

-Moduli a base di silicio:

All'inizio del processo sono smontati manualmente i telai in alluminio e le scatole di derivazione. Il modulo viene quindi schiacciato all'interno di un mulino, in modo da ottenere la separazione delle diverse frazioni di materiali (vetro, plastica, metalli).

Attraverso questo procedimento è possibile il recupero dell'80% del peso totale in entrata e il vetro misto ottenuto alla fine del processo è comunemente accettato dall'industria del vetro espanso e del vetro isolante.

-Moduli non a base di silicio:

Sono state sviluppate tecnologie di riciclaggio specifiche per questa categoria di pannelli fotovoltaici. Alcune di esse ricorrono all'uso di bagni chimici, i quali permettono la separazione dei diversi materiali semiconduttori. In particolare, il processo a cui sono sottoposti i moduli al tellururo di cadmio prendono avvio schiacciando il pannelli e successivamente separando le diverse frazioni. Tale procedimento è progettato per recuperare fino al 90% del vetro e il 95% dei materiali semiconduttori contenuti.

Su scala commerciale sono stati realizzati alcuni impianti di riciclaggio da parte di aziende private. Attualmente esistono due processi di riciclo gestiti a livello industriale:

- Processo di trattamento *First Solar*, impiegato per i moduli CdTe;
- Processo di *Deutsche Solar*, sfruttato principalmente per i moduli in silicio cristallino.

Tratteremo più dettagliatamente di questi procedimenti nel corso dei paragrafi che seguono, mentre i processi destinati alle altre tecnologie fotovoltaiche risultano ancora in fase di sviluppo.

2.2.1 Il trattamento First Solar

First Solar, azienda attiva nella realizzazione di pannelli solari con stabilimenti produttivi stanziati in Stati Uniti, Malesia e Germania, ha sviluppato un processo di riciclaggio destinato ai moduli CdTe a film sottile. La ditta gestisce anche la logistica per il recupero dei pannelli a fine vita, fornendo l'imballaggio e il trasporto verso il centro di trattamento. Essa quindi finanzia sia la raccolta che il processo di riciclo, riservando i fondi necessari al momento della vendita del modulo.

Il trattamento si compone di una serie di passaggi essenziali:

- I moduli sono triturati in pezzi di grandi dimensioni, per poter poi essere schiacciati da un mulino a martelli, in pezzi di misura inferiore a 5 mm, in modo da rompere i legami di laminazione;
- Le pellicole del semiconduttore sono rimosse e raccolte in un contenitore. Questo particolare procedimento prevede una durata di 4-6 ore, durante le quali viene aggiunto un sottile strato di acido solforico e perossido di ossigeno al vetro in modo da ottenere un ottimale rapporto solido-liquido;
- Il vetro è separato dai liquidi all'interno di un recipiente;
- Il materiale è trasferito in un vaglio vibrante⁹, il quale separa la componente del vetro dai pezzi più grandi di EVA. Quest'ultimo viene raccolto e depositato su un nastro trasportatore;

⁹ Il vaglio vibrante è una macchina che permette la separazione dei materiali dal punto di vista dimensionale.

- Una volta pulito, il vetro è depositato nei contenitori adibiti al riciclaggio e le acque impiegate per il lavaggio vengono pompate in un sistema di precipitazioni per il recupero dei metalli comuni;
- I composti metallici sono precipitati in tre fasi a pH crescente mediante l'utilizzo di idrossido di sodio. Le frazioni solide, dopo essersi trasformate in una massa metallica, vengono espulse per un'ulteriore successiva lavorazione in modo da essere riutilizzate come materie prime per la produzione di nuovi pannelli.

Tale procedimento presenta un elevato tasso di successo, dimostrandosi in grado di recuperare il 90% del vetro per l'utilizzo in nuovi prodotti, il 95% dei materiali semiconduttori per l'impiego in nuovi pannelli fotovoltaici, l'80% di tellurio, che a sua volta può essere rivenduto.

Da una parte i componenti principali della parte attiva delle pellicole (indio e tellurio) non costituiscono elementi particolarmente rari, essendo entrambi ottenuti come sottoprodotti della produzione dei metalli rame e zinco, d'altra parte la domanda degli stessi elementi può ancora influire molto sul potenziale di crescita del settore dei moduli a film sottile. Il riciclo fornirebbe quindi una spinta positiva al loro sviluppo commerciale.

Poiché l'impatto ambientale dei processi di riciclo delle pellicole sottili risulta trascurabile se confrontato con i processi della loro produzione, risulta ragionevole concludere che il riciclaggio di questa tipologia di moduli si traduce in una minor perturbazione dell'ambiente.

2.2.2 Il trattamento Deutsche Solar

L'azienda tedesca operante nel settore fotovoltaico Deutsche Solar ha presentato nel 2003 un impianto pilota e lanciato un progetto di riciclaggio in cui i componenti in plastica sono rimossi tramite processo termico, prima che il wafer di silicio sia recuperato. L'impresa riutilizza all'interno del suo ciclo produttivo i granuli di silicio recuperati, mentre tutto il resto è venduto o inviato allo smaltimento.

Il ritiro dei moduli è organizzato attraverso un sistema *bring-in*, il quale prevede che sia la società che gestisce l'impianto a provvedere all'inoltro del pannello al centro di

smistamento e/o riciclaggio. In fase di raccolta occorre maneggiare i moduli con prudenza, utilizzando per il trasporto l'imballaggio originale, il pallet o il container.

Il processo di riciclaggio si articola nelle seguenti fasi fondamentali:

- I moduli sono inceneriti e i componenti in plastica bruciati a 600 °C, in modo da decomporre velocemente le sostanze polimeriche (EVA) e permettere un corretto disassemblaggio. I restanti materiali, come le celle fotovoltaiche, il vetro e i metalli vengono separati manualmente;
- Il vetro e i metalli sono inviati alle rispettive filiere di riciclo;
- Le celle solari vengono recuperate per il wafer e subiscono un trattamento chimico, basato sostanzialmente su una serie di bagni in acido finalizzati alla pulizia della superficie della cella.

Secondo uno studio compiuto dall'associazione PV Cycle, i wafer riciclati risultano elettronicamente della stessa qualità di quelli nuovi, anche dopo aver subito tutte le lavorazioni appena riportate. Il silicio è tale da garantire il rifornimento come materia prima dei processi produttivi successivi. L'elemento infatti mantiene l'elevata purezza richiesta dalle applicazioni fotovoltaiche.

Nelle condizioni di mercato attuali il riciclaggio appare conveniente. Il processo permette di recuperare l'84% del peso totale del modulo in ingresso nelle frazioni di materiali ricavati con elevati gradi di purezza. La percentuale di vetro ottenuta, pari 90%, può essere riutilizzata nei nuovi prodotti, così come il 95% dei materiali semiconduttori in nuovi pannelli.

Il processo termico può garantire il recupero di almeno 98% delle celle danneggiate. Tale valore dipende dal livello di danneggiamento dei pannelli, dal tipo di struttura che lo caratterizza e dai moduli fotovoltaici impiegati. Nel caso in cui le celle presentino frantumazioni sui bordi o micro fessure, di norma non sono riciclabili come wafer intatti, ma possono comunque essere sfruttate per ottenere silicio sotto forma di materia prima-seconda a seguito di opportuni trattamenti del tutto simili ai precedenti, consentendo in questo modo di evitare l'estrazione del silicio a monte del processo di produzione. Occorre sottolineare che più sottile risulta lo spessore delle celle, minore è la resa. Infatti i wafer di spessore maggiore di 200 micron comportano meno rotture e

possono essere più facilmente recuperati per le celle solari. In caso di spessore inferiore il recupero di celle intatte appare arduo.

Il trattamento di celle ancora sane rappresenta quindi un'operazione ancora in fase di ottimizzazione poiché, seppur sostenibile, risulta piuttosto oneroso trattare wafer con spessori esigui. In conclusione l'obiettivo principale del processo si focalizza sul recupero di silicio come materia, ottenendo separatamente vetro, altri metalli puri e il silicio stesso.

Riportiamo qui di seguito alcune tabelle, contenenti una parte dei dati raccolti attraverso analisi effettuate da coloro che applicano tali metodologie di recupero.

Materiale	kg/m²	Massa %	Tasso di recupero %
Vetro	10,0	74,16	90
Alluminio	1,39	10,3	100
Celle solari	0,47	3,48	90
EVA, Tedlar	1,37	10,15	-
Ribbons	0,10	0,75	95
Adesivo, ecc.	0,16	1,16	-

Composizione di un modulo cristallino e percentuali di recupero dei materiali costituenti

	Modulo nuovo (kWh/Wafer)	Modulo riciclato (kWh/Wafer)
Produzione di silicio	7,55	-
Produzione di celle	0,62	0,65
Produzione dei moduli	1,12	1,12
Riciclaggio	-	0,4
Somme	9,32	2,17
Consumo di energia (per ogni kWh generato)	0,129 kWh	0,030 kWh

Confronto dei consumi energetici necessari alla produzione di un modulo nuovo e uno riciclato

Consumi energetici per la produzione dei moduli		
	Modulo nuovo	Modulo riciclato
Input energetici	9,32 kWh/wafer o 4,26 kWh/Wp	2,17 kWh/wafer o 0,99 kWh/Wp
Payback time energetico (EPBT)		
Alto livello di radiazione solare	2,58 anni	0,6 anni
Medio livello di radiazione solare	4,92 anni	1,14 anni

Energy Pay Back Time dei moduli fotovoltaici

2.2.3 Lo smaltimento operato da Sea Ecoservizi

Merita un discorso a parte il progetto intrapreso da Sea Ecoservizi, azienda con sede a Malo (Vicenza) specializzata nello smaltimento di monitor ed elettrodomestici, la quale recentemente ha sviluppato una delle prime linee di trattamento dei moduli solari in Italia.

Abbiamo precedentemente illustrato che i processi perseguibili per ottenere la separazione dei singoli componenti racchiusi all'interno di un modulo fotovoltaico possono essere di tipo termico oppure meccanico. La strada intrapresa dall'azienda percorre la seconda soluzione, poiché ritenuta la meno dispendiosa dal punto di vista energetico.

Il processo di trattamento realizzato può essere suddiviso in due fasi. Nella prima il modulo attraversa una macchina denominata devetratrice, la quale separa meccanicamente l'elemento vetroso della parte superiore dal modulo. Questa operazione presenta una durata di appena 10 secondi e il vetro triturato può essere rivenduto sotto forma di materia prima-seconda. Ciò che rimane del modulo risulta un supporto costituito dalle celle ancora incollate al materiale plastico, utilizzato per proteggere le celle stesse e farle aderire al vetro. Questa parte viene trattata in un secondo macchinario all'interno del quale, a seguito di un processo meccanico realizzato a temperature controllate, i singoli materiali vengono separati. Al termine del trattamento si ottengono rame, polvere di silicio e materiale plastico. Quest'ultima

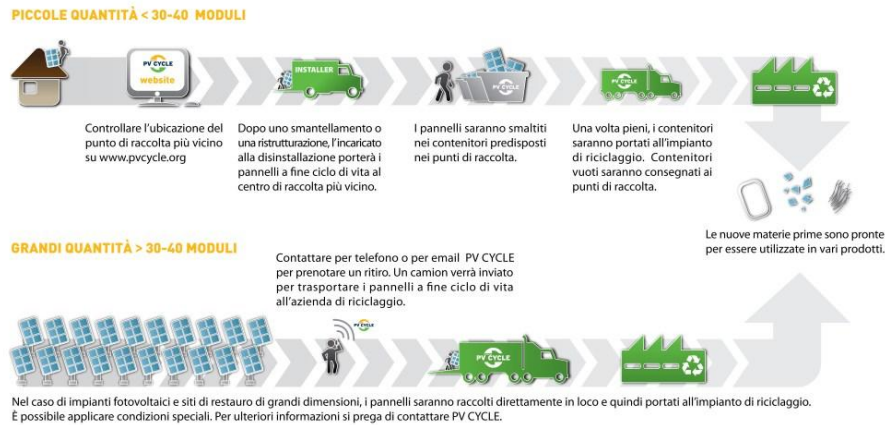
fase del procedimento rappresenta la più delicata, in quanto la separazione del silicio dal supporto plastico richiede maggiori accorgimenti tecnici.

L'intero processo permette il recupero del 98% del peso totale di un modulo fotovoltaico. In particolare il vetro ottenuto risulta di altissima qualità e può essere pagato bene. Non è possibile il riutilizzo della polvere di silicio per la costruzione di nuove celle, in quanto contiene ancora una percentuale di vetro, ma si rileva utile per le fonderie di ghisa. Lo stabilimento sta inoltre sperimentando un processo che garantisca l'estrazione di argento dalla polvere di silicio. Il metallo infatti ricopre le celle con percentuali superiori del 4% e il nuovo progetto contribuirà a ricoprire i costi rilevanti causati dalla raccolta dei moduli esausti. Infine la plastica recuperata è riciclata per poter essere poi impiegata nella realizzazione di contenitori e vasi.

Recentemente Sea Ecoservizi ha siglato un accordo con il consorzio italiano Cobat, finalizzato allo sviluppo tecnologico e industriale delle diverse attività previste dall'azienda.

3. Supporto di consorzi e associazioni no-profit

Per poter valutare l'impatto e i costi associati allo smaltimento dei pannelli e aggregare le aziende produttrici, nel tempo si sono formati organi che si prefiggono come scopo il coordinamento e la semplificazione delle procedure di recupero e riciclo produttori. Il già citato **PV Cycle** è stato uno dei primi consorzi a essere stato fondato dall'industria manifatturiera fotovoltaica. Esso è nato nel 2007 come associazione senza scopi di lucro e ancora oggi garantisce che i pannelli fotovoltaici dismessi siano raccolti in modo ecosostenibile ed economicamente vantaggioso. Attualmente appare particolarmente attivo a livello europeo nell'informare le aziende sulle potenzialità del suo programma e promuovere uno sviluppo del fotovoltaico sostenibile, rivolto a un adeguato processo di smaltimento.



Programma di recupero e riciclo presentato da PV Cycle

Per assicurare una risposta più efficiente alle crescenti esigenze operative e favorire una collaborazione con i partner locali il consorzio ha annunciato l'intenzione di aprire sedi nazionali in Germania e Italia. Infatti, parallelamente al suo programma di creazione di sedi locali, PV Cycle continua a contribuire allo sviluppo di regolamentazioni e processi sostenibili in ambito RAEE su scala nazionale. Il presidente dell'associazione Wilfried Taetow ha dichiarato che, avvicinando i propri servizi di raccolta e riciclaggio sul mercato, si desidera rafforzare le partnership esistenti e favorirne di nuove.

L'associazione dell'industria fotovoltaica italiana di Confindustria ANIE/GIFI appoggia pienamente le decisioni intraprese da PV Cycle, poiché ritenute utili a sensibilizzare maggiormente le aziende del settore verso un'opportuna gestione a fine vita dei moduli in linea con le regole nazionali.

Attualmente PV Cycle è presente in 27 Stati membri dell'Unione e nei paesi dell'EFTA (European Free Trade Association) e dall'avvio delle proprie attività ha raccolto nel tempo oltre 5.000 tonnellate di materiale fotovoltaico, di cui più della metà provenienti da Germania e Italia. Rappresento oltre il 90% del mercato solare europeo ed è il partner fidato di centinaia di società europee e internazionali. I servizi da esso offerti sono disponibili per chiunque desideri smaltire pannelli fotovoltaici a seguito di un progetto di smantellamento, demolizione o ristrutturazione.

In Italia la gestione dei moduli fotovoltaici deve rispettare la normativa europea che equipara i pannelli ai comuni rifiuti RAEE. Sono imposti processi di smaltimento che permettano il recupero della maggior parte delle sostanze di partenza. In questo modo

le materie prime contenute nei moduli possono essere reinserite nei rispettivi cicli produttivi, salvaguardando l'ambiente e riducendo le richieste energetiche dei diversi processi. Inoltre i soggetti responsabili, produttori e importatori sono chiamati ad aderire a un consorzio in grado di garantire prestazioni finalizzate al riciclo dei moduli. Un esempio è offerto da **Ecolight**, uno dei maggiori sistemi collettivi nazionali, il quale si propone di offrire un servizio dedicato di gestione dei rifiuti fotovoltaici. Esso ha rispettato tutti i criteri previsti dal GSE ed è stato certificato fin dalla pubblicazione del primo elenco dei sistemi autorizzati. Gli sono stati riconosciuti i requisiti previsti dal Disciplinare Tecnico, i quali non tengono conto solamente delle prestazioni tecniche relative al recupero e riciclo di moduli, ma anche del rispetto delle Regole Applicative previste dai decreti. Il consorzio, in collaborazione con CSR (Centro Servizi RAEE) ha sviluppato e reso disponibile un sistema integrato di raccolta e recupero per i pannelli solari rotti o non più funzionanti. Grazie alla capillare filiera italiana è stato reso possibile il recupero dei prodotti sull'intero territorio nazionale e il loro riciclo nel rispetto della legge e dell'ambiente. Il servizio comprende i seguenti punti fondamentali:

- Ritiro dei pannelli fotovoltaici vecchi o danneggiati a domicilio;
- Trasporto verso i centri di smaltimento;
- Recupero delle materie prime-seconde contenute;
- Smaltimento sostanze non riciclabili;
- Gestione delle pratiche burocratiche;
- Rispetto delle normative previste.

Un altro soggetto risultato idoneo alla gestione dei servizi di raccolta e riciclo è il Consorzio Nazionale Raccolta e Riciclo **Cobat**, il quale con i suoi 25 anni di attività rappresenta uno dei soggetti di riferimento nell'ambito di riciclo dei RAEE e, in particolare, dei moduli fotovoltaici, per il quale risulta leader del mercato costituendo più del 50% dei produttori e importatori italiani. Per Cobat è stato fondamentale poter garantire un sistema di monitoraggio orientato non solo allo smaltimento dei moduli fotovoltaici, ma all'intero ciclo di vita degli stessi. Tale controllo viene realizzato mediante un apposito software, il quale permette di ricondurre ogni singolo modulo al produttore o importatore che l'ha inserito sul mercato per la prima volta. Il direttore

generale di Cobat Michele Zilla ha confermato che il GSE, tramite la loro banca dati, è in grado di eseguire delle verifiche a campione sulla veridicità dei dati inseriti.

Zilla aggiunge inoltre che hanno reso possibile il recupero del 90-95% dei materiali presenti in un pannello, dal silicio all'argento, reimmettendoli nel ciclo produttivo. Non tutto risulta economicamente vantaggioso, come la lavorazione del vetro, ma appare fiducioso sulle innovazioni tecnologiche, le quali gli verranno sempre più incontro.

Possiamo dunque osservare che l'industria italiana si sta organizzando in maniera tale da rendere pienamente sostenibile il settore fotovoltaico. Questo impegno è già stato dimostrato nel 2011 dall'accordo sancito tra Comitato IFI e Cobat, il quale suggella la volontà di realizzare una forte filiera italiana che punta al riciclaggio di tutti i componenti presenti nel pannello. Il programma siglato dai due partner prevede che tutti i produttori e distributori associati al comitato potranno garantire ai propri clienti il ritiro dei pannelli fotovoltaici a fine vita. Tale piano di gestione rappresenta un'iniziativa senza precedenti in Italia, la cui importanza è testimoniata dai dati contraddistintivi del settore, che vedono la presenza di 100 milioni di moduli sul territorio nazionale. Un ulteriore aspetto rilevante è fornito dall'origine dei pannelli fotovoltaici presenti nel nostro paese. Infatti solo il 10% risulta prodotto da aziende italiane, mentre la restante parte viene importata dall'estero, rendendo dunque difficile tenere traccia dei materiali presenti nelle loro configurazioni. Sulla base di queste valutazioni il piano di raccolta è stato organizzato appoggiandosi a 90 aziende locali e rendendo disponibile da parte di Cobat la tecnologia di mappatura geo-referenziata di tutti gli impianti fotovoltaici presenti in Italia e il sistema di tracciabilità dei pannelli da riciclare, dal punto di raccolta fino alla destinazione finale. Tali attività sono rese possibili tramite l'istituzione di una banca dati centralizzata, resa accessibile per la consultazione anche alle autorità competenti.

In seguito alla raccolta, il Consorzio si occupa del frazionamento dei prodotti, attraverso il riciclo in Italia di tutte le componenti metalliche e vetrose, mentre la cella viene inviata all'estero per lo smaltimento finale. Attualmente il nostro Paese risulta privo di simili impianti, ma considera la prospettiva di realizzarne uno in futuro.

Cobat e il Comitato IFI si stanno tuttora impegnando nella promozione sull'intero territorio di una campagna di comunicazione e sensibilizzazione, affinché sia resa nota l'esistenza del sistema nazionale di gestione dei rifiuti fotovoltaici e di una partnership accreditata, in grado di offrire supporto legislativo, tecnico e amministrativo a privati cittadini, aziende e Pubblica Amministrazione. Si offre in questo modo al Paese un servizio ambientale che guarda alla sostenibilità lungo tutto il ciclo di vita del pannello fotovoltaico, recando grandi benefici rispetto l'identificabilità del prodotto, oltre a generare positive ricadute sull'indotto delle aziende italiane, che potranno così recuperare i materiali dei moduli in seguito alla loro disinstallazione.

4. Sviluppo di nuovi programmi di ricerca

Al fine di sostenere il progresso e offrire migliori servizi di gestione dei rifiuti fotovoltaici, i Sistemi Collettivi e le aziende operanti sul settore fotovoltaico promuovono iniziative rivolte all'innovazione, mediante opportuni investimenti. Lo stock di pannelli solari è aumentato considerevolmente negli ultimi anni ed è attualmente stimato a circa 3 milioni di tonnellate nell'UE. Le soluzioni sostenibili dedicate al recupero dei moduli non risultano ancora ben sviluppate e prediligono soluzioni di riciclo a basso valore. A partire dal 2015 si prevede che in Europa saranno smaltite circa 30.000 tonnellate/anno e nel corso dei prossimi 20 anni questa cifra potrebbe essere destinata a raggiungere il valore di 500.000 tonnellate/anno, di cui:

- 390.000 tonnellate di vetro;
- 55.000 tonnellate di alluminio;
- 35.000 tonnellate di materie plastiche;
- 11.500 tonnellate di celle in silicio.

Le tecnologie attuali riciclano il vetro a basso valore, come fibra di vetro o isolamento. Esse inoltre non consentono il pieno recupero dei metalli, in particolare del silicio cristallino. La produzione di quest'ultimo implica costi energetici equivalenti a tre anni di energia fotovoltaica, i quali rappresentano un grave inconveniente in termini di

prestazioni ambientali secondo un approccio che prende in considerazione l'intero ciclo di vita.

Gli investimenti su nuovi progetti di ricerca e sviluppo vengono incoraggiati anche durante eventi organizzati a livello internazionale, che permettono l'incontro di relatori provenienti da tutto il mondo, i quali nel corso del programma sottopongono idee e discutono delle potenziali sfide tecnologiche. Sul tema trattamento fotovoltaico, si distingue la Conferenza internazionale sul riciclaggio dei pannelli fotovoltaici, che nel 2013 si è tenuta a Roma. Nel corso del programma una piattaforma di esperti ed esponenti della catena del valore ha trattato dei recenti sviluppi raggiunti nel settore del riciclaggio e si è confrontata durante le argomentazioni. Questo tipo di organizzazioni rappresentano una sede importante per promuovere l'innovazione tecnologica e la ricerca.

Vengono di seguito proposti alcuni piani e progetti condotti da aziende manifatturiere e/o consorzi allo scopo far progredire le modalità di gestione dei rifiuti fotovoltaici.

4.1 Progetto SunMeet

Per applicare in maniera ottimale l'attività di smaltimento dei pannelli, esistono aziende che si pongono l'obiettivo di semplificare le operazioni di trattamento e ridurre i costi di bonifica. All'interno del nostro Paese è stato sviluppato il progetto SunMeet, frutto degli accordi siglati tra Cobat e il Comitato IFI. Il programma concordato si dimostra in grado di fornire un servizio indispensabile per coloro che acquistano un sistema fotovoltaico. Sostanzialmente il progetto prevede che le parti metalliche e vetrose siano riciclate internamente in Italia, mentre la cella solare venga portata all'estero per essere disassemblata e smaltita, diminuendo le emissioni di gas nell'ambiente durante il processo. I produttori e distributori che aderiscono a tale iniziativa potranno quindi offrire un servizio aggiunto ai propri clienti, assicurando ritiro e riciclo del prodotto esausti.

L'accordo prevede infine l'impegno a istituire un Tavolo Tecnico, il quale si propone come scopo finale la realizzazione di un impianto di riciclaggio nazionale. Attualmente gli unici centri di trattamento europei esistenti sono situati in Germania,

Spagna e Belgio. A tale scopo sono analizzate le tecnologie di trattamento dei moduli fotovoltaici esistenti sul mercato e viene realizzato uno studio di fattibilità per un impianto-pilota. Si potranno in questo modo sperimentare nuove modalità di riciclo, sulla base delle quali prevedere la possibilità di dotare il nostro Paese di un impianto nazionale, dedicato specificatamente allo smaltimento delle celle solari.

Il presidente del Comitato IFI ha espresso la ferma intenzione di divenire fortemente competitivi e leader del settore fotovoltaico nell'offrire una soluzione conveniente per lo smantellamento dei pannelli. Infatti, iniziative al pari di questo accordo possiedono la potenzialità di costituire modelli di riferimento replicabili in futuro anche all'estero.

4.2 Progetto di ricerca Photolife

In data 20 ottobre 2014, presso la sede della Confindustria Chieti, è stato presentato alla stampa un progetto riguardante il riciclo RAEE denominato "PHOTOLIFE", il quale si prefigge l'industrializzazione di soluzioni innovative, sviluppate dalla collaborazione di soggetti istituzionali, afferenti al settore della ricerca universitaria, e piccole medie imprese operanti nel settore. Il progetto concerne la realizzazione di un prototipo funzionale allo smaltimento dei pannelli fotovoltaici danneggiati o dismessi e prevede il recupero totale dei materiali costituenti, in modo poter garantire una loro valorizzazione commerciale come materie prime-seconde. L'importanza di questo progetto è stata riconosciuta dalla Comunità Europea, la quale ha sovvenzionato la sua realizzazione nell'ambito del programma LIFE+. Tale dotazione finanziaria ha incoraggiato molte azioni mirate allo sviluppo e all'attuazione della politica in materia ambientale dal 2007 al 2013. In questo caso specifico, si è intravisto nel progetto Photolife un veicolo utile allo sviluppo di attività produttive sostenibili, in grado di integrare tutte le questioni ambientali all'interno del settore che oggi va sotto il nome di "*Urban Mining*". Quest'ultimo concetto viene inteso come possibilità di incrementare le risorse sfruttando i rifiuti urbani, mediante l'istituzione di cicli di recupero e reimpiego di materiali la cui domanda risulta in costante aumento, ma la reperibilità sempre più difficoltosa.

Il piano di smaltimento così strutturato permetterà quindi di fornire una risposta valida e concreta alla domanda futura del settore fotovoltaico, il quale si ritroverà presto a dover affrontare una gravosa problematica ambientale concerne l'eliminazione dei moduli esauriti. Si tratta di uno dei pochi casi sul territorio nazionale di trasferimento diretto delle innovazioni tecnologiche dall'ambito di ricerca universitario alle imprese e rappresenta ormai un modello consolidato di collaborazione.

Il sistema di disassemblaggio meccanico dei pannelli sarà industrializzato e realizzato internamente nella provincia di Chieti, sfruttando le competenze già presenti sul luogo. Le fasi preliminari, inerenti la prototipazione dell'impianto sperimentale, stanno suscitando interesse da parte di importanti attori di respiro internazionale operanti nel settore del High Tech e tale considerazione lascia sperare in apprezzabili ritorni sul territorio in termini di occupazione e investimento.

4.3 Progetto Full Recovery End Life Photovoltaic

Un altro progetto finanziato dal bando europeo LIFE+ è quello che vede la collaborazione di Sasil S.p.A, Stazione Sperimentale del Vetro (SSV) e PV Cycle nella ricerca di metodologie atte al recupero integrale dei pannelli fotovoltaici. Il progetto, denominato FRELP, si propone quindi lo studio di differenti approcci al trattamento per portare l'odierna quota media di riciclo al 100% in maniera economicamente sostenibile, ottenendo così la riduzione del consumo energetico complessivo di un modulo. I partner si impegnano nel testare nuovi metodi di riciclaggio e tecnologie innovative che consentano il recupero ad alto valore di vetro, silicio, metalli ed energia dal laminato EVA. Attualmente due risultano le soluzioni ambientali proposte:

- Recupero del vetro ad alta qualità extra chiaro, da impiegare nell'industria del vetro cavo e del vetro piano, riducendo in modo significativo sia il consumo di energia che le emissioni di CO₂ nel processo di fusione del vetro;
- Recupero di silicio metallico, da utilizzare come ferro silicio all'interno delle leghe ferro-silicio oppure, nel caso sia abbastanza puro, trasformarlo in silicio amorfo per la produzione di pannelli a film sottili. Anche in questo caso si

viene a ridurre il consumo energetico e le emissioni di CO₂ associate alla produzione primaria di silicio.

Il sistema di gestione è progettato per sviluppare quattro fasi di trattamento, le quali corrispondono al medesimo numero di scelte tecnologiche applicate. Ogni passaggio è interessato a una particolare parte del processo di recupero del pannello, che nel dettaglio prevede i seguenti punti:

1. RAC – Recupero di Alluminio e connettori;
2. REV – Recupero di EVA e Vetro;
3. PES – Recupero di energia e cenere dal composto EVA;
4. RSM – Recupero di Silicio e metalli dalla cenere.

La conduzione del progetto si articola in una serie di passaggi fondamentali, ciascuno dei quali è accompagnato da una serie di attività di monitoraggio e valutazione.

All'avvio del progetto si prevede il recupero di numerosi campioni fotovoltaici dal partner PV Cycle, per essere conferiti a SSV in modo da poter eseguire un'analisi dettagliata dei diversi componenti che caratterizzano i pannelli dismessi. Sulla base delle valutazioni eseguite, si ottimizzano le tecnologie utili ai processi di recupero più complessi, in particolare la metodologia di separazione del materiale vetroso dal supporto EVA per applicazioni industriali e del procedimento di recupero dei metalli.

In riferimento ai risultati ottenuti nel corso della fase precedente, si procede alla realizzazione di due prototipi: il sistema robotizzato per il recupero dell'alluminio e dei connettori (RAC) e un sistema specifico per la separazione del polimero EVA dal vetro e il recupero di entrambi i componenti (REV). Nel frattempo viene adattato il forno di pirolisi messo a disposizione dalla sede di produzione Sasil, in modo da garantire il recupero dell'energia e delle ceneri dell'EVA, e un altro reparto esistente viene adeguato per il recupero del silicio e dei metalli dalla cenere.

Dopo orientativamente due anni dall'inizio del progetto gli impianti pilota saranno pienamente operativi per iniziare a condurre i test sulle tecnologie di separazione dell'alluminio, dei connettori, del polimero EVA e del vetro. A tal proposito, PV Cycle fornirà circa 3.500 tonnellate di pannelli dismessi. Gli impianti quindi si dedicheranno alla produzione di un quantitativo di materiale tale da poter eseguire le

prove delle ultime fasi di trattamento, finalizzate al recupero di energia, silicio e metalli.

Durante l'intera durata del progetto, viene valutato l'impatto ambientale provocato dalle tecnologie e verrà effettuato un Life Cycle Assessment sui risultati del processo di trattamento sperimentato. Infine, si compierà una valutazione degli impatti da un punto di vista socio-economico.

I risultati attesi dal trattamento dei pannelli fotovoltaici tramite i nuovi impianti risultano vari e in particolare prevedono:

- Il totale recupero dell'alluminio e dei connettori per il riciclaggio nei rispettivi comparti industriali;
- Lo sviluppo di una nuova tecnologia per il miglioramento del distacco dell'EVA dal vetro, preservando la purezza di quest'ultimo in modo da permettere il suo riciclo integrale di alto valore;
- Il recupero di energia dal processo di distacco del silicio cristallino e dei metalli;
- Lo sviluppo di una tecnologia innovativa finalizzata al pieno recupero di silicio;
- Il recupero integrale di metalli da destinare al riciclaggio nei rispettivi comparti industriali;
- Riduzione considerevole del consumo di energia e di emissioni di CO₂, imputabili all'uso di rottame di vetro nel forno di fusione, alla sostituzione del silicio vergine con quello riciclato e alla produzione energetica dalla scomposizione dell'EVA.

In particolare, a partire dal quantitativo di 3.500 t di pannelli fotovoltaici, si auspica l'ottenimento in uscita di tutte le frazioni separate dei materiali previsti nel processo, così suddivise: 2.800 t di vetro, 350 t di alluminio, 35 t di connettori, 90 t di combustibile, 70 t di gas, 157,5 t di gasolio, 24 t di silicio puro, 3, 15 t di metalli, 0,35 di rifiuti organici.

Sul sito di Sisal (<http://www.sasil-life.com>) vengono riportati periodicamente aggiornamenti sullo stato di avanzamento del progetto e le scoperte incontrate nel corso d'opera.

4.4 Dispositivo mobile per il riciclo dei pannelli fotovoltaici

Il progetto di ricerca Photovoltaics Panels Mobile Recycling Device, nominato anche PV Morede, mira allo sviluppo e la successiva industrializzazione di un dispositivo mobile per il riciclo brevettato. Rispetto ad altri sistemi per la gestione dei rifiuti industriali consente il trattamento dei moduli direttamente nel luogo in cui sono installati, negli impianti di trattamento dedicati e nelle industrie specializzate nella produzione di moduli, garantendo in questo modo un smaltimento conveniente e facilmente accessibile per piccole quantità di pannelli fotovoltaici. Tale piano di ricerca e penetrazione nel mercato è stato reso possibile dal finanziamento messo a disposizione dal programma Eco Innovation del 2012. Il progetto è stato avviato ufficialmente il 1° ottobre 2013 e vede impegnato il consorzio accreditato La Mia Energia nel ruolo di coordinatore e l'Università di Firenze, il Centro Tecnologico Leitat in Spagna e PV Cycle come partner. Essi si propongono entro il 2016 la messa in funzione di un impianto in ognuno dei seguenti paesi: Germania, Spagna, Francia e Italia.

L'ingresso sul mercato di questo processo innovativo di riciclaggio in loco permette l'eliminazione dei costi associati alla movimentazione dei moduli e una diminuzione del 40% delle spese di smaltimento per ogni tonnellata di rifiuto trattata. Una volta che l'impianto sarà operativo garantirà il recupero e riutilizzo di diversi materiali importanti, quali vetro, alluminio, rame e materiale metallico fotosensibile.

4.5 Rendere l'industria fotovoltaica "doppiamente verde"

È dal suo anno di fondazione che l'associazione PV Cycle ha pianificato e incoraggiato numerose attività per favorire l'introduzione di una gestione complessiva dei rifiuti fotovoltaici, applicate prima in Germania e in seguito introdotte in altri Paesi europei. I suoi programmi hanno iniziato a sollecitare altri mercati, come Stati Uniti e Giappone, ad adottare approcci simili, tanto che i suoi piani di informazione e promozione possono essere già giudicati un'iniziativa di scala globale.

Il primo vero progetto intrapreso dall'associazione inerente allo smaltimento dei pannelli risale a maggio 2009 e fu condotto con la collaborazione dei partner della

provincia di Chevetogne (in Belgio) e l'azienda di installazione elettrica Nizet. Chevetogne è stato uno dei primi grandi sistemi di riscaldamento solare avviato in Europa e venne costruito nel 1983 assieme ad altri 16 impianti pilota, sostenuti dalla Commissione Europea. La dismissione dell'impianto ha costituito una fondamentale esperienza di apprendimento per lo sviluppo e l'affermazione di un ciclo di riciclaggio del fotovoltaico da introdurre in tutta Europa.

Il progetto prevedeva lo smontaggio e il riciclo del generatore, il quale non era più operativo dal 2003 ed era formato da una combinazione di 2000 moduli fotovoltaici. Riportiamo qui di seguito una tabella che sintetizza i dati relativi ai quantitativi dei materiali in ingresso e quelli recuperati in seguito al trattamento di ciascun modulo.

	Input (kg)	Quantità relativa (%)	Output (kg)	Raccolta/Rendimento (%)
Vetro	5.93	65.82	5.75	96.96
Plastica	0.94	10.43	*	*
Cellule e cellule rotte	0.26	2.89	0.22	84.62
Rame	0.09	1.00	0.07	77.78
Alluminio	1.58	17.54	1.58	100.00
Scatola di Giunzione	0.21	2.33	*	*
Totale	9.01	100.00	7.62	84.57

* Recupero energetico

Si può dunque concludere che i progetti di ricerca realizzati e in corso d'opera risultano numerosi e promettenti. Non solo i consorzi e le imprese manifatturiere, ma anche i centri di ricerca universitari stanno dimostrando forte interesse nel determinare la piena maturazione tecnologica nella dismissione dei pannelli fotovoltaici. A tale scopo stringono fra loro accordi e collaborazioni in modo che ognuno possa contribuire con i propri mezzi a disposizione alla realizzazione di uno sviluppo sostenibile, condividendo competenze, figure professionali e strutture produttive.

CONCLUSIONI

Nel corso dell'elaborato abbiamo evidenziato come i sistemi fotovoltaici abbiano riscontrato negli ultimi anni una rilevante impennata nel numero delle installazioni. Essi permettono la generazione di energia pulita, senza determinare la formazione di inquinamento o scarti durante la produzione. Visto il progressivo esaurimento delle fonti fossili e l'interesse generale rivolto alla tematica ambientale, i pannelli solari si stanno affermando sempre più come valida fonte alternativa, utile al nostro sostentamento energetico.

Sebbene permetta la produzione di un'energia rinnovabile, senza provocare emissioni di gas e ripercussioni all'ambiente, occorre riportare l'attenzione sulla fase di dismissione al termine del suo ciclo di vita. Infatti, per poter affermare che un'installazione fotovoltaica permetta la generazione di un'energia sostenibile, si rende necessario l'adozione di un'ottica complessiva dell'intero processo che lo riguarda. Molto spesso le analisi tecniche e ambientali relative a un sistema rinnovabile si concentrano principalmente sulla sua fase di produzione, senza tener conto dell'intero ciclo di vita a cui va incontro. Per poter operare una valutazione completa occorre invece prendere in considerazione tutti gli stadi che caratterizzano il suo percorso, dall'estrazione delle sostanze costituenti al trattamento finale. A tale scopo ci viene in soccorso l'analisi LCA – *Life Cycle Assessment*, la quale permette di identificare tutti gli impatti ambientali derivabili dalle fasi di vita di un bene, fornendo una caratterizzazione complessiva del prodotto.

Per questo motivo, oltre a evidenziare i benefici ambientali garantiti da un impianto fotovoltaico, risulta necessario prendere in considerazione le modalità di trattamento a cui dovranno sottoporsi i pannelli giunti a fine vita. Nel prossimo futuro il loro quantitativo è destinato ad aumentare drasticamente, prevedendo solo in Italia un livello di 1,5 milioni di tonnellate da dover smaltire. In caso si rincorra a una gestione degli impianti esauriti non adeguata, gli effetti ambientali risulterebbero drammatici. Infatti i pannelli vedono al loro interno la presenza di alcune sostanze pericolose, che se liberate nell'ambiente provocherebbero ingenti ripercussioni sull'ecosistema e la salute umana. Lo smaltimento degli impianti fotovoltaici deve quindi essere orientato a un riciclaggio ad alto valore. In questo modo non solo si eviterebbero potenziali

danni all'ambiente, ma si ricaverebbero benefici di tipo economico. Il riciclo dei pannelli solari infatti garantisce il recupero di materie e componenti riutilizzabili all'interno dei cicli produttivi, aiutando le aziende a rendersi autosufficienti e a evitare di rendere ancora più precarie la reperibilità e la disponibilità delle risorse presenti sul nostro pianeta.

All'interno dei capitoli si è inoltre osservato che l'affermazione di questo tipo di energia rinnovabile viene a dipendere dal contributo e l'appoggio di diversi soggetti, tra cui i decisori politici. Risulta infatti necessario garantire una condizione legislativa adeguata, atta a tutelare e valorizzare tali installazioni fotovoltaiche. L'emanazione di opportune normative deve prefiggersi come scopo lo sviluppo sostenibile del mercato fotovoltaico, in grado di conciliare i benefici ambientali, economici e sociali. In ambito normativo ha rappresentato una svolta storica l'inserimento dei pannelli solari all'intento della classificazione prevista dalla direttiva europea RAEE. Gli impianti fotovoltaici devono quindi essere soggetti ai trattamenti imposti ai rifiuti provenienti dalle apparecchiature elettriche ed elettroniche. In generale occorre prevedere per loro la raccolta, il trasporto ai centri di riciclaggio autorizzati, la messa in sicurezza delle componenti pericolose e il riutilizzo dei materiali recuperabili. Gli impianti attrezzati devono inoltre predisporre di adeguate soluzioni di riciclaggio, le quali devono garantire la massimizzazione del valore di ciascun componente ed elemento contenuti nel pannello.

Per quello che riguarda gli impianti fotovoltaici, la nuova Direttiva RAEE si rivolge in modo particolare ai "Produttori" e al contributo che essi possono offrire. La definizione di Produttore include tutti gli attori presenti nella filiera che realizzano o distribuiscono i pannelli fotovoltaici con il proprio marchio. Con l'entrata in vigore della direttiva essi sono divenuti responsabili della dismissione dei pannelli che hanno immesso sul mercato. Una volta che questi giungono al termine del loro ciclo di vita, i produttori devono quindi provvedere alla loro raccolta e finanziare lo smaltimento. Allo scopo di favorire un trattamento finalizzato al riciclaggio, si deve orientare la produzione dei pannelli fotovoltaici al loro smaltimento finale sin dalle prime fasi di progettazione. I produttori sono quindi tenuti ad adottare un approccio di prevenzione, applicando strumenti *Design For Recycling* e *Design For Disassembly*, al fine di

facilitare lo smontaggio e il recupero dei componenti, e adeguando i processi tecnologici in modo tale che impiegano un minor quantitativo di materiale nella costruzione e prediligano sostanze ecosostenibili.

Le imprese manifatturiere e i distributori hanno inoltre l'obbligo di aderire a un Consorzio o un Sistema Collettivo, in grado di garantire corretti processi di trattamento ai rifiuti fotovoltaici. In Italia il GSE (Gestore Servizi Energetici) ha recentemente pubblicato una lista dei sistemi che hanno soddisfatto tutti i requisiti tecnici e ambientali richiesti per poter adempiere le funzioni previste dalla normativa. Tale elenco conta la presenza tredici consorzi esistenti sul nostro territorio, autorizzati alla raccolta e allo smaltimento degli impianti fotovoltaici. Questi sistemi collettivi permettono di aggregare le aziende produttrici e aiutare le imprese nel corretto recepimento delle direttive europee.

Oltre alla disposizione di un opportuno ambiente normativo, sta emergendo come nuovo e promettente strumento di politica ambientale quello che prevede la formazione di accordi volontari, i quali permettono di integrare la tutela dell'ambiente con i sistemi di gestione attuati dalle imprese. Essi vengono sanciti tra la pubblica amministrazione e le imprese, i quali pianificano gli obiettivi e si impegnano nel loro raggiungimento. In questo ambito, l'iniziativa più importante proviene dall'accordo siglato tra il consorzio Cobat e il Comitato IFI (associazione industrie italiane fotovoltaiche), il quale istituisce la volontà di creare una filiera italiana per la raccolta e il riciclo dei pannelli. Si intende inoltre progettare il primo impianto-pilota nazionale destinato al riciclaggio dei rifiuti fotovoltaici.

Lo sviluppo del settore fotovoltaico deve quindi essere sostenuto non solo da un adeguato quadro normativo, ma anche dall'impegno derivante da tutti i soggetti appartenenti alla filiera, i quali contribuiscono a far progredire i processi tecnologici attraverso investimenti nella ricerca. Numerosi risultano i progetti in corso d'opera, finalizzati a un miglioramento delle prestazioni garantite dai pannelli e alle scoperte di innovativi procedimenti di riciclaggio. Nella maggior parte dei casi queste sperimentazioni vedono la collaborazione di imprese, consorzi e ricercatori appartenenti all'ambito universitario. Tutti questi contributi permettono di rafforzare la credibilità e l'appetibilità del mercato solare come piattaforma di investimenti.

All'interno del segmento fotovoltaico, diversi risultano i campi che si prestano all'innovazione e allo sviluppo, quali la progettazione, la manutenzione, il riciclaggio, ecc. Tutti questi aspetti contribuiscono a determinare numerosi benefici in termini di valore aggiunto e di posti di lavoro.

In questi ultimi anni si è assistito all'affermarsi di innovative tecnologie fotovoltaiche, le quali ricorrono all'impiego di elementi semiconduttori alternativi rispetto al silicio, al fine di ottimizzare i rendimenti e migliorare la conversione energetica. Tuttavia sta stando sempre più attenzione l'affermarsi di nuove tipologie di componenti abbinabili agli impianti, quali sistemi di accumulo e inverter, in grado di perfezionare sia la produzione energetica che il consumo. I dispositivi di stoccaggio permettono infatti di accumulare l'energia prodotta in esubero e renderla poi disponibile in qualsiasi momento in cui l'impianto non è in grado di produrre. Tali elementi sono ritenuti una valida opportunità per il progredire della tecnologia fotovoltaica, tanto che si prevede per il 2015 un mercato dedicato interamente a loro. In Italia sono state recentemente approvate in merito alcune delibere per adeguare l'integrazione di questi componenti *storage* al sistema elettrico nazionale. Tali configurazioni si prestano bene sia al servizio di singole abitazioni che imprese manifatturiere. Constatando che i prezzi riferiti all'energia elettrica prelevata dalla rete nel nostro territorio sono risultati tra i più alti in Europa, in futuro una valida soluzione al nostro fabbisogno energetico risiede quindi nell'autoconsumo dell'energia prodotta dagli impianti fotovoltaici. Oltre a garantire un sensibile miglioramento della trasmissione elettrica, i sistemi di accumulo permettono infatti di ottimizzare i consumi, facendo fronte alla produzione discontinua dei pannelli solari. Inoltre, l'eventuale presenza di un sistema intelligente di controllo permette di identificare i momenti in cui è possibile consumare l'energia autoprodotta da quelli in cui risulta necessario prelevarla dalla rete elettrica. In questo modo si rendono gli edifici e gli stabilimenti quasi completamente autosufficienti dal punto di vista energetico.

Un ulteriore spinta al mercato fotovoltaico viene offerta dai SEU – Sistemi Efficienti di Utenza, i quali rappresentano un nuovo modo di vendere l'energia. In un'ottica di lungo termine, i nuovi modelli di business del fotovoltaico vedono l'integrazione dei SEU ai dispositivi di accumulo energetico, il cui funzionamento è risultato

particolarmente efficiente abbinando la produzione alle modalità previste dallo Scambio sul posto, il quale permette il consumo diretto o differito della totalità dell'energia elettrica autoprodotta. Infatti quest'ultimo meccanismo permette di immettere in rete l'energia generata e non immediatamente consumata, per poi prelevarla in un secondo momento di necessità.

Il contributo energetico offerto dal sistema fotovoltaico appare cresciuto negli ultimi anni e, in particolare, in Italia ha raggiunto il 7% del fabbisogno elettrico nazionale. Secondo una relazione del 2012 delineata da EPIA (associazione dell'industria fotovoltaica europea) si ritiene che la tecnologia solare costituirà il pilastro del mercato elettrico europeo, prevedendo per il 2030 una quota del settore pari al 25-30%.

Grandi speranze vengono quindi riposte nelle potenzialità garantite dalla produzione energetica di tipo fotovoltaica. Quello che non risulta certo è la comprensione e la presa di coscienza da parte dei ruoli governativi dell'elevato valore economico offerto dal settore e del contributo che potrà esprimere all'interno del mix energetico.

Appare necessario rendere solido il parco fotovoltaico attuale e permettere una sua ottimizzazione in termini di produzione e consumo energetico, in modo che il settore raggiunga la sua piena maturità. Attraverso quindi l'aggiornamento delle regole di mercato, del quadro normativo e delle infrastrutture tecniche è possibile garantire l'integrazione su grande scala del fotovoltaico e la sua flessibilità nella generazione dell'energia elettrica futura.

In conclusione il fotovoltaico offre buoni presupposti per l'innovazione e lo sviluppo della produzione energetica, tali da poter soddisfare il nostro fabbisogno elettrico futuro. Per la sua affermazione si rende necessario innanzitutto un adeguato contesto normativo, in grado di proteggere e valorizzare il settore. Un rilevante contributo viene offerto anche dalle collaborazioni nate tra Imprese, Enti locali e Sistemi collettivi, i quali si impegnano nella continua ricerca di sistemi di raccolta sempre più efficienti e nel garantire ai rifiuti fotovoltaici soluzioni di riciclaggio ad alto valore. Inoltre non si devono arrestare i finanziamenti e gli accordi sanciti per la realizzazione di progetti di sviluppo, finalizzati alla scoperta di tecnologie sempre più performanti e di processi di produzione e riciclaggio ottimizzati. Appare fondamentale adottare una prospettiva complessiva nell'adozione del fotovoltaico, che non si focalizzi solo sui benefici

garantiti dalla sfruttamento di una fonte pulita e rinnovabile , ma anche concentrarsi sulla crescente necessità legata al suo smaltimento futuro. Solo in questo modo si potrà affermare che il fotovoltaico rappresenta una tecnologia verde pienamente sostenibile, in grado di contribuire al raggiungimento di obiettivi sia ambientali che economici ed energetici.

BIBLIOGRAFIA

- 23rd NREL Workshop on Crystalline silicon Solar Cell and Modules: Material and Process (Colorado), *Current and future priorities for mass and material in silicon PV module recycling*, 2 ottobre 2013.
- 29th EU PVSEC (Amsterdam), *Process Development on Photolithography IBC solar cells*.
 - *Strategies for ultra-low Ag consumptions*, 22-26 settembre 2014.
- Angelelli E., *Fotovoltaico. Nuovo record di efficienza per i pannelli al tellururo di cadmio*, in “nextville.it”, 4 marzo 2013.
- Altroconsumo, *Fotovoltaico: è ancora conveniente installarlo?*, in “altroconsumo.org”, 2 settembre 2013.
- Ballochi A., *Pannelli fotovoltaici, il riciclo è obbligatorio*, in “tekneco.it”, 24 novembre 2014.
- Bennett I. J., *Compatibility of copper plated cells with MWT module technology*, 4th Metallization workshop (Constance), 7-8 maggio 2013.
- Berlen L., *Nei dai EPIA la “globalizzazione” del fotovoltaico*, in “QualEnergia.it”, 5 giugno 2014.
- Buchert M., Schuler D., Bleher D., *Critical metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential*, in “resourcefever.con”, 2009.
- Bureau of International Recycling, *Recycling through the ages*.
 - *Report on the Environmental Benefits of Recycling* in “bir.org”.
- CasaeClima, *Sistemi di accumulo SEU, Anie bocchia la segnalazione dell’AEEGSI*, in “casaclima.com”, 31 luglio 2014.
 - *EPIA, entro il 2015 i prezzi del fotovoltaico scenderanno del 40%*, 3 febbraio 2011.
- Commissione Europea – Comunicato Stampa, *Ambiente: meno rischi da sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche*, 20 luglio 2011.
- D’Alessandris L., *I pannelli fotovoltaici rientrano nella classificazione RAEE*, in “Ambiente.it”, 5 maggio 2014.
- EnergMagazine, *Smaltire i pannelli fotovoltaici*, in “energmagazine.it”.
- Eni-Mit Solr Froniters Center – Comunicato Stampa, *il MIT ed Eni inaugurano a Cambridge il Solar Frontiers Center*, 4 maggio 2010.

- FotovoltaicoNordItalia, *Grid Parity nel fotovoltaico: cos'è*, in “fotovoltaiconorditalia.it”, 3 marzo 2014.
- *I pannelli fotovoltaici si possono riciclare?*, in “PV Cycle.org”, 15 marzo 2013.
- Franchetto F., *Articolo 65 nella versione definitiva: il destino del fotovoltaico nelle aree agricole*, in “nextville.it”, 26 marzo 2012.
- Friends of the Earth Europe, *Extended Producer Responsibility*, in “foeeurope.org”.
- Gatti C., *Quanta politica nell'energia*, in “ilsole24ore.com”, 27 novembre 2014.
- Gazzetta Ufficiale, *Attuazione delle direttive relative alla riduzione dell'uso di sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche*, in “camera.it”, 2005.
- Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, *Direttiva 2008/98/CE*, in “sistri.it”, 2008.
- Georgia Institute of technology, *Design For Recycling*.
- *Recycling Guidelines*, in “srl.gatech.edu”.
- Giliberto J., *Energia, bollette ridotte alle PMI*, in “ilsole24ore.com”, 18 ottobre 2014.
- GRID United Nations Environment Programme, *Waste Management – Small is beautiful*.
- *A History of Waste Management*, in “grida.no”.
- Illumina Magazine, *In Italia già raggiunta la grid parity?*, in “asso elettrica.it”
- Ineuropa, *Approvato il VII Programma d'azione per l'ambiente*, in “ineuropa.it”, 3 febbraio 2014.
- Ispra, *Rapporto Rifiuti Urbani 2012*, in “isprambiente.gov.it”.
- Massa M. F., *Che cosa sono gli impianti fotovoltaici? Funzionamento, installazione tipologie*, in “fotovoltaicosulweb.it”.
- Notarnicola S., *Il recupero e il riciclo dei moduli fotovoltaici a fine vita. Se ne parlerà a Solarexpo*, in “qualenergia.it”, 30 aprile 2014.
- Krueger K., *Overview of First Solar's Module Collection and Recycling Programme*, Brookhaven National Laboratory, 1999.
- Lamboglia A., *Pannelli fotovoltaici, vent'anni e non sentirli?*, in “il cambiamento.it”, 23 febbraio 2012.
- Marchetti A., *Smaltimento dei moduli fotovoltaici, che fare?*, in “lastampa.it”, 7 marzo 2013.
- Meneghello G., *Fotovoltaico, il 2015 sarà l'anno del decollo dei SEU*, in “qualenergia.it”, 6 gennaio 2015.
- *Fotovoltaico con accumulo: conviene già ora?*, 3 marzo 2014.

- O’Sullivan B. J., *From the labs: Are your solar panels recyclable?*, in “Imec Magazine”, novembre 2014.
- Parallel-event 29th EU PVSEC (Amsterdam), *PV Life Cycle Management & Recycling*, 23 settembre 2014.
- Pipere P., *RAEE. Produzione e recupero delle apparecchiature elettriche ed elettroniche*, Hyper Edizioni, 2007.
 - *Uno contro uno. Come garantire il ritiro dei rifiuti elettrici dai consumatori*, 2013
- PV Cycle, 3rd *International Conference on PV Module Recycling*, 11 giugno 2012.
 - *L’obbligo in Italia di riciclare i moduli fotovoltaici rappresenta un passo fondamentale per il settore*, in “italy.pvcycle.org”, 10 aprile 2014.
- Quaglia L., *Con il decreto legge “competitività” norme per la riduzione bollette*, in “il messaggero.it”, 20 novembre 2014.
- QualEnergia, *PV Cycle, il riciclo dei moduli fotovoltaici punta alla conformità RAEE*, in qualenergia.it, 21 marzo 2012.
- Ragni R., *Fotovoltaico: come smaltire i pannelli dopo la nuova direttiva RAEE?*, in “greenbiz.it”, 14 maggio 2014.
 - *Smaltimento pannelli: l’elenco del GSE dei consorzi idonei soddisfa tutti?*, 4 marzo 2013.
 - *Sistemi di accumulo e SEU, un attacco dall’Aeegsi alla generazione distribuita in autoconsumo*, 1 agosto 2014.
- Recyclezone, *Education Resources from Waste Watch*, in “recyclezone.org”.
- Redazione QualEnergia, *Oneri di sistema sull’autoconsumo: quanto e come si paga nel 2015?*, in “qualenergia.it”, 27 gennaio 2015.
 - *Pubblicata la delibera sui sistemi di accumulo*, 24 novembre 2014.
- *Dazi sul fotovoltaico cinese, EPIA si schiera contro*, 26 settembre 2014.
- *Taglia-bollette e splma-incentivi: il dl Competitività è ora legge*, 8 agosto 2014.
- ReMedia, *Siglato il nuovo Accordo di Programma ANCI-CdC RAEE*, in “consorzioimedia.it”, 28 marzo 2012.
- Rizzo R., *Pannelli solari: smaltimento è una vera miniera*, in “corriere.it”, 17 gennaio 2014.
- Rotondaro A., *Riciclo dei moduli a fine vita. Un bilancio economico e ambientale*, in “architetturaecosostenibile.it”, 8 gennaio 2014.
- SolarExpo, *Il fotovoltaico in Italia è vivo e conviene anche senza Conto Energia*, in “solarexpo.com”, 23 aprile 2014.

- *Speciale Tecnico: investire nel parco fotovoltaico esistente*, 23 dicembre 2014.

- *Il futuro mercato del fotovoltaico passa per gli accumuli. Un technology focus a Solarexpo*, 16 aprile 2014.

- Think Cans, *About Educational Resources*, in “thinkcans.net”.
- Trabucco E., *Firmato l'accordo di programma tra Cobat e IFI per il riciclaggio made in Italy dei pannelli fotovoltaici*, in “legalground.eu”, 21 ottobre 2011.
- UNITEL, *Dall'Europa via libera al Cadmio nei pannelli solari*, in “unitel.it”, 10 gennaio 2011.
- Università degli Studi dell'Aquila – Comunicato Stampa, *Urban mining e riciclo di pannelli fotovoltaici a fine vita*, 20 ottobre 2014
- US Department of Energy, *Critical Materials Strategy*, 2011
- US Environmental Protection Agency, *Reduce, Reuse, Recycle, - Wastes, Educational Material*, in “epa.gov”.
- Venturi L., *Il riciclo dei pannelli fotovoltaici diventa un obbligo dal 2014*, in “green report.it”, 4 febbraio 2014.
- Vinciarelli F., *Investitori italiani ed esteri si muovono per vie legali contro lo Spalma Incentivi e manca ancora il decreto attuativo*, 24 ottobre 2014
- Zuliani F., *Rifiuti Fotovoltaici*, in “ilpost.it”, 27 agosto 2014.