



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Università degli Studi di Padova

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica e Meccatronica

TESI DI LAUREA TRIENNALE

**Vantaggi economici derivanti dal processo
di riciclaggio di moduli fotovoltaici**

Candidato:

Stefano Marchioro

Matricola 593423

Relatore:

Alessandro Persona

Anno Accademico 2011-2012

Indice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUZIONE | 5 |
| 1.1 | L'aumento dei consumi energetici | 5 |
| 1.2 | Combustibili fossili | 6 |
| 1.3 | Fonti di energia alternative | 7 |
| 1.3.1 | Il problema dei rifiuti | 9 |
| 1.4 | Obiettivi della tesi | 10 |
| 2 | I MODULI FOTOVOLTAICI | 11 |
| 2.1 | Tecnologia al silicio cristallino | 11 |
| 2.2 | Tecnologia a film sottile | 16 |
| 2.3 | Tecnologie a confronto | 19 |
| 3 | IL RICICLAGGIO | 21 |
| 3.1 | L'associazione PV Cycle | 21 |
| 3.1.1 | Prime prove su impianti pilota | 22 |
| 3.2 | Processi di Riciclaggio esistenti | 24 |
| 3.2.1 | Il processo della First Solar | 24 |
| 3.2.2 | Il processo della Deutsche Solar | 27 |
| 3.2.3 | Il processo della Sunicon | 29 |
| 3.3 | Sviluppi per il futuro: l'approccio "Cradle to Cradle" | 31 |
| 4 | POSSIBILI SCENARI E POLITICHE DI SOSTEGNO | 33 |
| 4.1 | Scenario A: "Worst Case" | 34 |
| 4.2 | Scenario B: "Voluntary Action" | 35 |
| 4.3 | Politica A: "Residential PV included in the scope of the WEEE directive" | 36 |
| 4.4 | Politica B: "All PV included in the scope of the WEEE directive" | 38 |
| 5 | IPOTESI PRELIMINARI | 39 |
| 5.1 | Crescita del mercato fotovoltaico | 39 |
| 5.2 | Quantità di rifiuti generati | 42 |
| 5.3 | Impatti Ambientali | 44 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.3.1 | Rischi ambientali | 44 |
| 5.3.2 | Perdita di materie prime | 45 |
| 5.4 | Impatti economici | 47 |
| 5.5 | Impatti sociali | 50 |
| 6 | ANALISI ECONOMICA COMPLETA | 51 |
| 6.1 | Considerazioni e valutazioni con riferimento all'anno 2050 | 55 |
| 6.1.1 | Scenario A: "Worst Case" | 55 |
| 6.1.2 | Scenario B: "Voluntary Action" | 56 |
| 6.1.3 | Politica A: "Residential PV in WEEE" | 57 |
| 6.1.4 | Politica B: "All PV in WEEE" | 58 |
| 7 | CONCLUSIONI | 59 |

Capitolo 1

INTRODUZIONE

1.1 L'aumento dei consumi energetici

L'energia è considerata l'input indispensabile per il funzionamento dei cicli produttivi, del sistema dei trasporti e di tutti i processi alla base del nostro tenore di vita. Ogni cosa per funzionare ha bisogno di una certa quantità di energia.

La forma di energia più utilizzata è sicuramente quella elettrica: da quando si è diffusa è parte integrante del nostro vivere quotidiano e non è più possibile farne a meno.

Questo ci porta a riflettere su una realtà che ormai è sempre più incombente: le risorse energetiche tradizionali impiegate per la produzione di energia alla fine si esauriranno, il loro utilizzo crea conseguenze sempre meno gestibili e l'uomo deve trovare soluzioni che gli consentano di assicurare l'attuale standard di vita salvaguardando, al tempo stesso, l'ambiente in cui vive.

Attualmente il consumo di energia è in continuo aumento, sia per effetto della crescita demografica sia in relazione alle nuove esigenze dei Paesi emergenti.

Nel passato, fino a quando l'utilizzo energetico era limitato in intensità, i suoi effetti non erano tenuti in considerazione come possibili cause di cambiamenti climatici: la Terra veniva considerata in grado di rimanere sempre in equilibrio, riassorbendo le emissioni dannose procurate dall'uomo.

Come si può vedere in figura 1.1 i consumi energetici odierni sono molto differenti rispetto ad un po' di anni fa: negli anni '70 dello scorso secolo, per esempio, si consumavano circa 6 miliardi di tonnellate di petrolio equivalente, mentre quarant'anni dopo le tonnellate sono più di 12 miliardi.

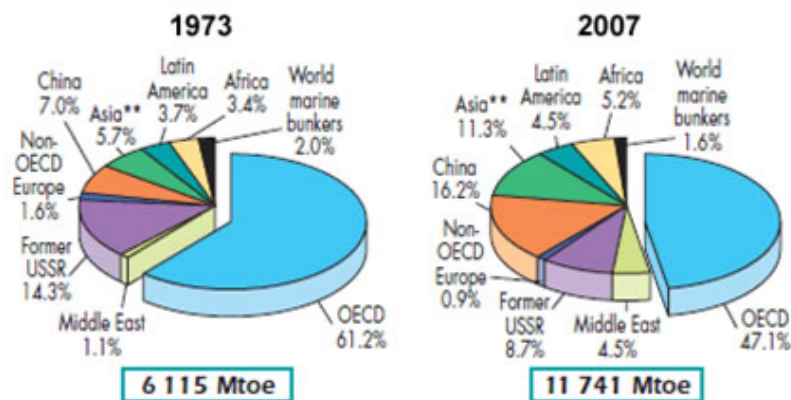


Figura 1.1: Consumi energetici mondiali negli anni 1973 e 2007

1.2 Combustibili fossili

La rapidità di utilizzo dei combustibili fossili è diventata via via maggiore ed è tuttora in aumento, causando una rapida diminuzione delle loro scorte disponibili ed un progressivo accumulo di emissioni nocive nell'atmosfera.

Gli effetti collaterali e dannosi legati al loro utilizzo sono tanti.

La loro combustione crea anidride carbonica, il gas maggiormente responsabile del surriscaldamento globale.

Questo aumento di temperatura ha un notevole impatto sull'ambiente e si ripercuote su numerosi ambiti: nell' Artico e in Antartide ad esempio le temperature più calde sono la causa dello scioglimento dei ghiacci, cosa che porta all'aumento del livello del mare e all' alterazione della composizione dell'acqua del mare circostante.

Un'altra diretta conseguenza dell'uso di combustibili fossili è l' inquinamento atmosferico, con aumento di smog e degrado della salute umana.

Oltre a ciò si ci sono anche i pericoli che derivano dalla "raccolta" di combustibili fossili, soprattutto carbone e petrolio: non sono rari purtroppo incidenti, problemi e fuoriuscite non desiderate di petrolio che causano devastazione ad interi ecosistemi. Il problema è che i combustibili fossili non sono rinnovabili: essi sono presenti sulla Terra in quantità limitate e un giorno le loro scorte saranno esaurite completamente. Quanto limitate siano le nostre riserve di combustibili fossili non si sa: alcune stime dicono che le riserve si esauriranno entro 50 anni, mentre altre dicono che dureranno ancora 100/120 anni.

L' aspetto fondamentale però resta evidente: è necessario fin da ora attrezzarsi per cambiare il modo di produzione di energia e di far fronte ad una fine delle scorte di combustibili fossili.

1.3 Fonti di energia alternative

In questi ultimi anni il problema è diventato sempre più importante ed ha incentivato lo studio e la ricerca di fonti di energia alternative.

C'è una grande quantità di informazioni ed entusiasmo oggi sullo sviluppo e aumento della produzione del fabbisogno energetico globale da fonti energetiche diverse: energia solare, eolica, idrica e geotermica sono tutte le fonti tradizionali di energia alternativa che hanno fatto notevoli progressi.

L'energia alternativa è un concetto interessante quando ci si pensa: significa infatti semplicemente che l'energia viene prodotta da fonti diverse dalle fonti di energia primaria, ovvero i combustibili fossili.

Al momento ci sono molti dubbi e problemi che questa forma di energia è chiamata a risolvere: basta pensare che la crescita della popolazione, che si prevede raggiungerà i 9 miliardi di persone nei prossimi 50 anni, porterà come ulteriore conseguenza un aumento considerevole delle richieste energetiche.

Alle energie rinnovabili non basterà quindi "solo" sostituire i combustibili fossili nella produzione di energia necessaria al giorno d'oggi ma esse dovranno iniziare anche a tenere il passo con la crescita della popolazione.

Ad oggi infatti le fonti di energia alternativa, chiamata anche energia rinnovabile, insieme forniscono solo il 7% del fabbisogno energetico del mondo: i combustibili fossili, insieme con l'energia nucleare, stanno dunque fornendo ancora il 93% dell'energia necessaria.

In figura 1.2 si può notare la produzione di energia elettrica dalle varie fonti rinnovabili:

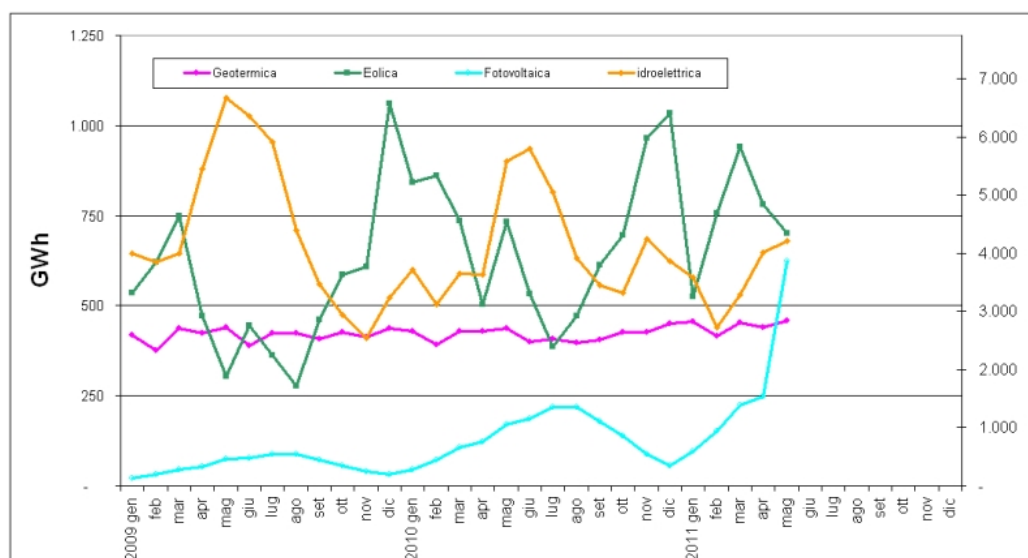


Figura 1.2: Energia da fonti rinnovabili

La crescita del mercato fotovoltaico

Tra le possibili fonti di energia rinnovabile l'energia solare in questi anni è risultata quella con uno sviluppo maggiore.

La produzione di celle e di moduli fotovoltaici infatti è più che raddoppiata nel 2010 rispetto all'anno precedente, raggiungendo un volume di 23,5 GW in tutto il mondo: si tratta di un incremento di 500 volte rispetto al 1990, quando la produzione globale ammontava a solo 46 MW.

Un dato che da solo rappresenta l'evoluzione del settore e lo caratterizza come uno dei comparti a più rapida crescita degli ultimi anni: trend che è tuttora positivo nonostante la crisi economica che affligge l'economia globale.

L'industria fotovoltaica si è sviluppata molto rapidamente spostando ultimamente il suo baricentro in Asia. La più rapida crescita nella produzione annuale negli ultimi cinque anni può essere infatti osservata proprio nel continente asiatico, con la Cina e Taiwan che rappresentano ormai da sole il 60% della produzione mondiale.

La Cina, in particolare, oggi risulta essere il maggiore produttore di celle e moduli fotovoltaici al mondo, seguita da Taiwan, Germania e Giappone.

Non a caso tra le più grandi industrie mondiali di produzione di celle e moduli fotovoltaici solo quattro grandi imprese hanno stabilimenti in Europa, di cui tre sono in Germania: l'americana First Solar (che ha sedi negli Usa, Germania, Malesia, Vietnam), la Q-Cells (in Germania e in Malesia), e la Solarword (in Germania e negli Usa), e la Rec (in Norvegia e Singapore).

L'Unione europea mantiene tuttavia il primato della capacità cumulativa installata di oltre 29 GW alla fine del 2010: il 70% dell'energia elettrica prodotta dal fotovoltaico in tutto il mondo è installata e prodotta in Europa, come è visibile in figura 1.3.

| Country | 2010 | 2011 |
|------------------|---------------|---------------|
| USA | 937 | 2.073 |
| Ontario (Canada) | 213 | 730 |
| Germany | 7.251 | 7.100 |
| Italy | 3577 | 4.100 |
| France | 719 | 1.307 |
| Belgium | 390 | 488 |
| Czech Republic | 1331 | 350 |
| United Kingdom | 95 | 350 |
| Spain | 250 | 345 |
| Greece | 120 | 235 |
| Bulgaria | 20 | 70 |
| Japan | 950 | 1100 |
| China | 400 | 700 |
| South Korea | 145 | 170 |
| Rest of World | 798 | 1.779 |
| Total | 17.196 | 20.897 |

Figura 1.3: Mercato fotovoltaico nel 2010 e previsioni finali per il 2011

1.3.1 Il problema dei rifiuti

La crescita esponenziale delle installazioni fotovoltaiche sta costringendo i produttori a confrontarsi con i rischi che possono derivare da uno smaltimento non corretto dei moduli giunti a fine vita.

Fino a pochi anni fa il problema dello smaltimento era poco sentito sia per la giovane età della tecnologia fotovoltaica sia per la lunga durata dei moduli, stimabile in una vita utile media di circa 25 anni.

D'altra parte però l'avvio significativo del fotovoltaico comincia ad essere già "datato", soprattutto in paesi come la Germania, gli USA ed in misura minore anche in Italia: è quindi evidente l'urgenza di attrezzarsi fin da ora per trovare dei metodi sostenibili per lo smaltimento dei rifiuti generati dai moduli a fine vita.

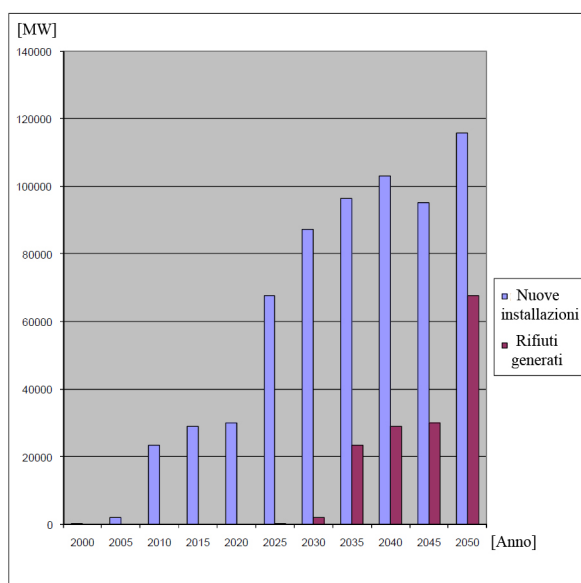


Figura 1.4: Mercato fotovoltaico e rifiuti previsti per i prossimi anni in Europa

Se non viene predisposta una appropriata infrastruttura prima che la quantità di pannelli da smaltire cominci ad aumentare notevolmente, i pannelli solari potenzialmente potranno costituire in futuro una seria minaccia di "rifiuto elettronico".

Si tratta inoltre di rifiuti voluminosi che non possono essere lasciati ai bordi delle strade e che, se non gestiti in maniera adeguata, potrebbero causare i problemi tipici derivanti dall'abbandono dei rifiuti ingombranti: un sistema che per anni, durante la fase di utilizzo, ha prodotto energia pulita rischia così di trasformarsi in un altro degli innumerevoli dispositivi tecnologici di difficile smaltimento che intasano le discariche.

Si tratta di una fine ingloriosa e soprattutto in netto contrasto con quello che è lo scopo principale della produzione di energia da fonti rinnovabili.

Si può intuire che lo smaltimento in discarica dei moduli rappresenterebbe una soluzione inaccettabile sia da un punto di vista ambientale che economico: una gestione inappropriata porterebbe ad un notevole spreco di energia e di risorse prime e causerebbe inoltre l'immissione nell'ambiente di sostanze pericolose come il Piombo o il Cadmio.

Una valida alternativa consiste dunque nell'attuare un processo di riciclaggio dei moduli, recuperando e riutilizzando tutti i loro componenti.

1.4 Obiettivi della tesi

Lo scopo di questa tesi è quindi di dimostrare come una corretta gestione dell' "end of life" dei moduli fotovoltaici possa portare in futuro a dei benefici sia in termini economici sia in termini ambientali.

Per fare un' analisi corretta e approfondita si prenderanno in considerazione e si studieranno diversi aspetti fondamentali, tra i quali:

- l'identificazione degli impatti ambientali ed economici dati dalla fine vita dei moduli fotovoltaici;
- la descrizione dei possibili scenari e delle politiche applicabili in futuro per regolamentare i rifiuti fotovoltaici;
- il confronto tra i risultati ottenuti nelle diverse situazioni possibili.

Si elencheranno inoltre, per completezza d'informazioni, i diversi tipi di moduli fotovoltaici presenti sul mercato e si descriverà il processo di riciclaggio, elencando anche le soluzioni presenti al momento attuale.

Capitolo 2

I MODULI FOTOVOLTAICI

Un modulo fotovoltaico è un dispositivo in grado di convertire l'energia solare direttamente in energia elettrica mediante effetto fotovoltaico.

Può essere esteticamente simile al pannello solare termico, ma lo scopo e il principio di funzionamento sono molto differenti.

Attualmente sul mercato sono presenti varie tipologie di moduli fotovoltaici, ognuna delle quali si differenzia sostanzialmente in base ai materiali semiconduttori e ai processi produttivi impiegati.

Da un punto di vista costruttivo, i moduli possono essere divisi catalogati in:

- moduli a celle fotovoltaiche (tecnologia al silicio cristallino);
- moduli thin film (tecnologia al film sottile).

2.1 Tecnologia al silicio cristallino

Nei moduli con tecnologia al silicio cristallino il materiale impiegato per realizzare le celle fotovoltaiche è silicio purissimo, il quale viene "stampato" in celle molto sottili. Tipicamente le celle hanno uno spessore di circa 0,2 mm e sono di forma quadrata con il lato di 125 mm.

Le due tipologie di celle basate su questa tecnologia si differenziano in base al tipo di silicio utilizzato.

Il silicio impiegato può essere di due tipologie:

- **Monocristallino**

Le celle in silicio monocristallino presentano il grado di maggiore purezza del materiale e garantiscono le migliori prestazioni in termini di rendimento, a fronte però di un prezzo più elevato.

Questo tipo di silicio è lo stesso impiegato per la produzione della componentistica elettronica.

Nella struttura monocristallina gli atomi di silicio sono orientati nello stesso verso e legati gli uni agli altri allo stesso modo, garantendo un'elevata omogeneità. Il colore delle celle è blu scurissimo o nero uniforme e appaiono esteticamente omogenee.

I moduli attualmente in commercio basati su questa tecnologia hanno un'efficienza variabile tra il 16% e il 17%;

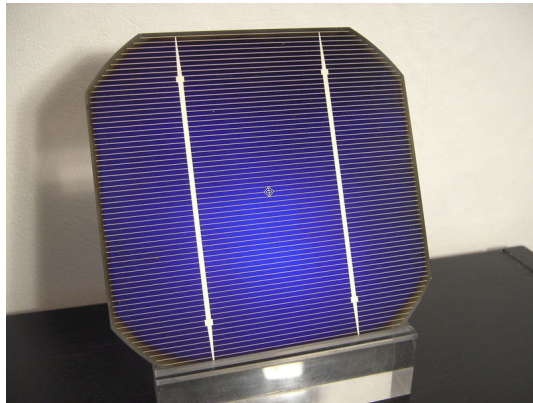


Figura 2.1: Cella monocristallina

- **Policristallino**

Le celle policristalline possono essere ottenute anche dal riciclaggio del materiale scartato dalla produzione di componentistica elettronica, rifuso per ottenere barre cristalline compatte.

In questo caso gli atomi risultano aggregati in piccoli grani monocristallini orientati in maniera casuale: la struttura pertanto rimane meno ordinata ed omogenea e il materiale presenta un minor grado di purezza rispetto al silicio monocristallino.

Queste caratteristiche comportano però una diminuzione dell'efficienza dei moduli, attestata tra l'13 e il 14%.

Le celle hanno un colore blu intenso cangiante e l'eterogeneità del cristallo resta visibile anche ad occhio nudo.

Il costo leggermente inferiore rispetto al monocristallino e la gradevolezza estetica del colore rende questo materiale il più usato nelle integrazioni architettoniche.

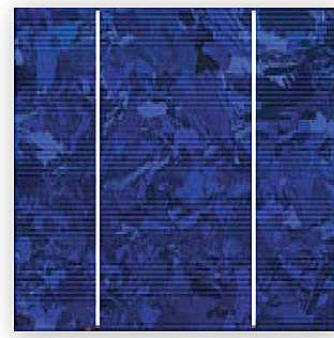


Figura 2.2: Cella policristallina

Per entrambe le tipologie di silicio utilizzato si denotano caratteristiche e tecnologie realizzative simili.

Le celle cristalline devono essere realizzate con spessori relativamente grandi sia perchè sono piuttosto fragili, caratteristica che vincola la scelta del tipo di supporto su cui possono essere alloggiare (supporti rigidi), e sia perchè il silicio cristallino non presenta una significativa capacità di assorbimento della luce. I moduli inoltre hanno una composizione standard e costituita da vari "strati":

- **Copertura Esterna:** è generalmente costituita da una lastra di vetro temperato a basso tenore di ossido di ferro, dotato di un elevato valore della trasmittanza nella banda del visibile e di una buona resistenza meccanica. La sua presenza è essenziale poichè garantisce il buon funzionamento e la durata del modulo, impedendo che l'acqua piovana, il vapore e le particelle inquinanti penetrino in esso danneggiandolo o riducendo la sua efficienza. Garantisce inoltre la protezione rispetto a possibili urti dovuti alla caduta della grandine o di altri materiali;
- **Sigillante anteriore:** è un foglio adesivo trasparente tramite il quale si fissano le celle al vetro di copertura. E' costituito generalmente da uno strato di materiale polimerico, l'EVA (etilene vinil-acetato), che garantisce contemporaneamente un buon isolamento dielettrico e la tenuta agli agenti esterni;
- **Celle e contatti:** è l'insieme delle celle fotovoltaiche collegate tra loro in serie e/o parallelo e dei contatti che le connettono (ribbon). A partire dai contatti anteriori e posteriori delle celle, vengono innanzitutto posti dei prolungamenti dei contatti, cioè i ribbon, che vengono saldati alle celle, in corrispondenza dei busbar, al fine di collegarle in serie. Si tratta di interconnessioni che sono realizzate mediante dei sottili nastri metallici (generalmente in rame stagnato) elettrosaldati, i cui terminali vengono fatti uscire dal laminato, attraverso un foro sulla faccia posteriore del modulo;

- **Sigillante posteriore:** costituito da altro foglio adesivo trasparente di EVA che viene posto sotto le celle e grazie al quale esse vengono fissate alla chiusura posteriore;
- **Chiusura posteriore:** lastra di chiusura che ha caratteristiche di tenuta simili a quella superiore.

Essendo la prestazione meccanica richiesta minore rispetto a quella per la facciata superiore si utilizza normalmente un rivestimento sintetico, più economico del vetro, come il Polivinilfluoruro (PVF) noto commercialmente come Tedlar.

Il "sandwich" di materiali così strutturato viene trattato termicamente in un forno in un processo, detto laminazione, in cui tramite un riscaldamento a circa 150 °C per circa un'ora si realizza la sigillatura dei vari componenti.

L'EVA, in origine traslucido e solido, si fonde diventando trasparente e si stende uniformemente tra le celle di silicio, per poi tornare solido una volta raffreddato.

L'aria ed il vapore presenti tra gli interstizi inoltre vengono eliminati, evitando così possibili processi di corrosione.

In seguito a questo processo di laminazione i vari strati sono uniti tra di loro e non più separabili, andando a disporsi come in figura 2.3:

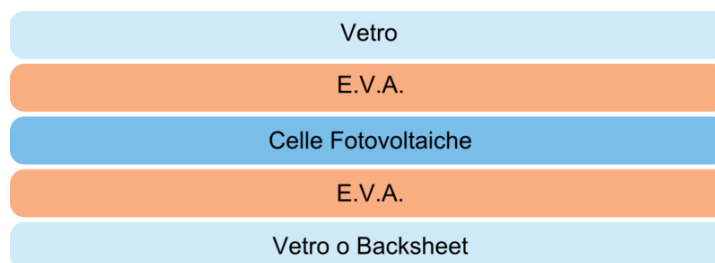


Figura 2.3: Composizione degli strati per un modulo cristallino

Il laminato così ottenuto viene poi completato con l'aggiunta di:

- **cornice in alluminio:** serve da interfaccia tra il modulo ed il supporto su cui verrà installato, è dotata di fori e asole che permettono il fissaggio del pannello tramite imbullonatura o agganciamento;
- **scatola di giunzione:** essa collega le bandelle dei collegamenti delle celle fotovoltaiche tramite dei diodi di by-pass e realizza i collegamenti elettrici che saranno accessibili poi tramite cavi esterni utili per collegare il modulo ad altri moduli o al quadro elettrico finale.

In figura 2.4 possiamo vedere un esempio di modulo al silicio monocristallino:

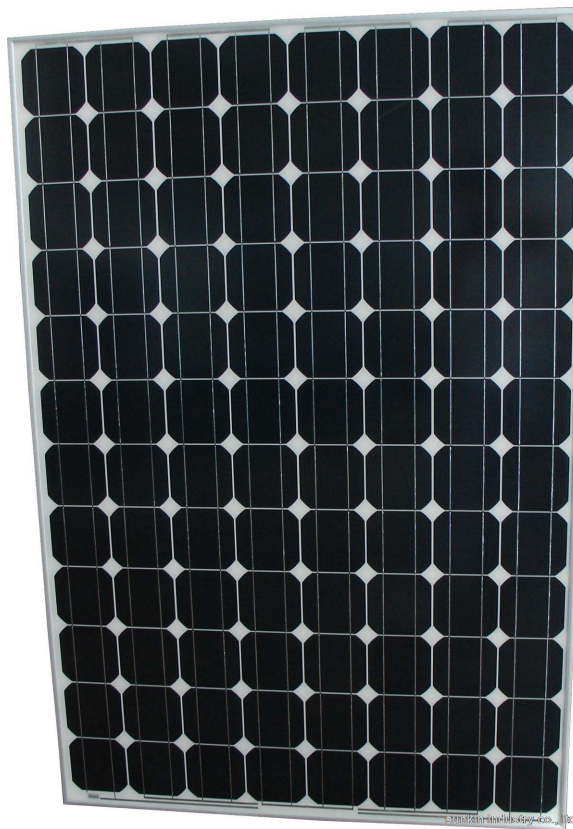


Figura 2.4: Esempio di modulo in silicio monocristallino

2.2 Tecnologia a film sottile

I moduli thin film, pur costituendo ancora ad oggi un mercato "di nicchia", si stanno affermando sempre più come principale alternativa ai moduli con celle al silicio per una serie di motivazioni:

- la quantità di materiale semiconduttore usata è almeno 100 volte inferiore a quella impiegata per i moduli cristallini;
- il processo di fabbricazione richiede meno energia e risulta più semplice di quello relativo alle celle a wafer di silicio: può essere quindi completamente automatizzato arrivando ad avere un ritmo produttivo più elevato;
- è possibile utilizzare come substrato anche del vetro comune a basso costo (vetro soda lime).

Queste caratteristiche rendono più economici e competitivi i moduli a film sottile, spiegando così la loro rapida diffusione avvenuta negli ultimi anni.

La peculiarità di questo tipo di tecnologia è proprio nell'impiego di materiali con una maggiore capacità di assorbimento della luce solare rispetto al silicio cristallino: ciò permette di ridurre decisamente il consumo e lo spessore dello strato di materiale fotoattivo necessario (dell'ordine di qualche micron) e ovviamente anche lo spessore dei relativi moduli.

Lo strato di materiale può essere distribuito direttamente su una grande varietà di superfici di appoggio (es. vetro, acciaio inossidabile o supporti plastici) e inoltre è possibile realizzare anche moduli flessibili.

Tutto questo si "paga" però in termini di efficienza, che risulta essere minore dei moduli al silicio cristallino.

Le prestazioni più stabili nel tempo fanno sì che i moduli risultino meno influenzati dalle condizioni meteo e inoltre risultano essere molto più sensibili alla radiazione diffusa, rendendoli efficienti anche in condizioni di cielo coperto.

I moduli a film sottile sviluppati e disponibili sul mercato sono diversi:

- **Silicio Amorfo (a-Si)**

In questi moduli il film sottile è costituito da atomi di silicio orientati in maniera casuale come avviene in un liquido, conservando però le caratteristiche dei corpi solidi.

Tale materiale assorbe la luce più efficientemente del corrispettivo silicio cristallino, per cui lo spessore della cella in silicio amorfo può essere ridotto fino a 300 volte.

Il rendimento di conversione dei moduli basati su tale tecnologia inoltre è indipendente dalle variazioni della temperatura d'esercizio.

L'efficienza tipica di questi moduli tuttavia è sensibilmente più bassa rispetto a quella dei moduli cristallini, dell'ordine del 5/7%, ed è soggetta ad un decadimento consistente delle proprie prestazioni nel primo mese di vita, imponendo quindi un sovradimensionamento della superficie installata;

- **CIS/CIGS**

Il materiale semiconduttore presente è un composto policristallino formato da Diseleniuro di Indio Rame (CIS), eventualmente arricchito con Gallio (CIGS) per incrementarne le prestazioni e depositato in genere su un substrato di vetro. L'efficienza tipica di questi moduli è compresa tra l' 8% e il 10%;

- **CdTe**

Il semiconduttore impiegato è sempre un composto policristallino, il tellururo di cadmio, realizzato con tecnologie simili a quella utilizzata per i CIS.

Le prestazioni attendibili da questa tecnologia sono ottime, ma la sua prospettiva di applicazione su larga scala è limitata dalle problematiche di smaltimento al termine del ciclo di vita del modulo, dal momento che il cadmio è molto tossico.

L'efficienza tipica di questi moduli è compresa tra il 7% e il 10%.

Anche i moduli fotovoltaici a film sottile sono composti da strati differenti di vari materiali:

- **Copertura Anteriore:** generalmente costituita da una lastra di vetro temperato.
Può essere sostituita da plexiglas o da altri composti polimerici trasparenti qualora si voglia applicare il modulo su delle superfici ondulate e/o flessibili;
- **Strato conduttivo superiore:** è lo strato di ossido che funge da contatto anteriore e che viene depositato direttamente sulla copertura esterna.
E' generalmente costituito da ossido di Stagno o di Indio;
- **Film sottile:** strato che "sostituisce" le celle in silicio cristallino. E' costituito dal materiale che effettua la conversione fotovoltaica dell'energia (a-Si, CdTe, CIS o CIGS);
- **Contatto metallico posteriore:** strato che funge da contatto posteriore, generalmente costituito da un mix di argento e alluminio;
- **Sigillante posteriore:** foglio adesivo trasparente (costituito sempre da un foglio di EVA) che funge da isolante verso gli agenti esterni;
- **Chiusura posteriore:** strato dello stesso materiale della copertura anteriore.

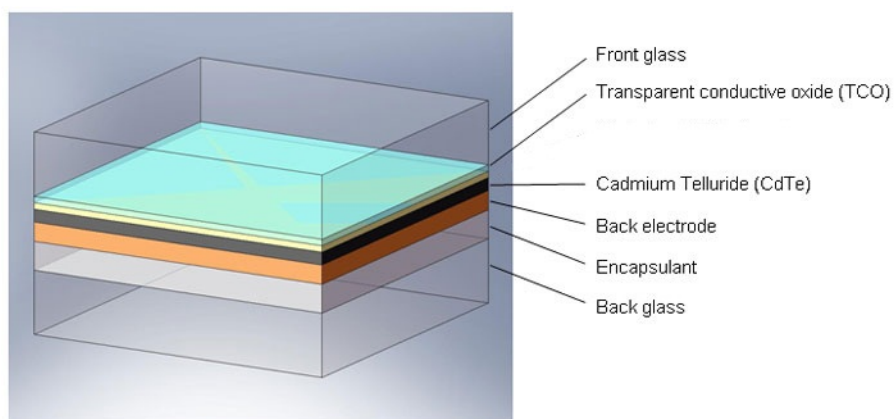


Figura 2.5: Composizione degli strati per un modulo in CdTe

Di seguito nella figura 2.6 si può vedere un esempio di modulo a film sottile:



Figura 2.6: Modulo rigido

2.3 Tecnologie a confronto

Per una successiva analisi dei costi è utile fare un confronto tra la composizione e la struttura delle varie tipologie di modulo esistenti.

Data l'impossibilità tecnica di reperire informazioni su tutti i possibili moduli presenti sul mercato, sono stati considerati i valori medi presenti nelle tipologie di modulo maggiormente diffuse: le nuove tecnologie emergenti dunque non sono state considerate in questa analisi.

La figura 2.7 mostra quindi in dettaglio le caratteristiche medie di composizione, potenza e dimensioni:

| | Moduli al silicio cristallino | Moduli a film sottile | | |
|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------|------------|
| | | a-Si | CdTe | CIS / CIGS |
| Peso totale per modulo [kg] | 5 - 28 | 11,7 - 20 | 9 - 15 | 10,2 - 20 |
| Potenza [Wp] | 120 - 300 | 60 - 120 | | |
| Dimensioni tipiche [m ²] | tipiche: 1,4 - 1,7 massime: 2,5 | 1,4 - 5,7 | 0,6 - 1,0 | |

Figura 2.7: Caratteristiche dei vari tipi di moduli fotovoltaici

La figura seguente mostra invece in dettaglio la percentuale, rispetto al totale, dei singoli materiali coinvolti:

| Materiale | Moduli al silicio cristallino | Moduli a film sottile | | |
|--|-------------------------------|---------------------------|-------|-------------------------|
| | | a-Si | CdTe | CIS / CIGS |
| Vetro | 74 % | 86 % | 95 % | 84 % |
| Alluminio | 10 % | < 1 % | < 1 % | 12 % |
| Altri componenti (inclusi i metalli rari) | 16 % | 14 % | 4 % | 4 % |
| Altri componenti (contenuto maggiore dell' 1%) | EVA, Tedlar, silicio, adesivo | Poliolo, MDI | EVA | EVA |
| Metalli rari contenuti | Argento (Ag) | Indio (In), Germanio (Ge) | | Indio (In), Gallio (Ga) |
| Presenza di Cadmio (Cd) o Piombo (Pb) | Pb | | Cd | Cd |

Figura 2.8: Composizione percentuale dei vari tipi di moduli fotovoltaici

Queste tabelle mostrate risulteranno necessarie quando si andrà ad analizzare la possibile perdita economica dovuta al non riutilizzo delle materie prime e alla valutazione dei possibili benefici.

Capitolo 3

IL RICICLAGGIO

Attualmente il riciclaggio dei moduli fotovoltaici non è ancora conveniente economicamente dato che il volume di rifiuti generati è ancora piccolo.

La maggior parte dei rifiuti infatti è rappresentata dai pannelli che hanno raggiunto una fine di vita prematura a causa di incidenti o malfunzionamenti o a pannelli che vengono scartati durante la produzione perché non raggiungono gli standard di qualità voluti.

Ad oggi quindi conviene ancora produrre i moduli con materie prime "vergini" e non riciclate, nonostante la quantità elevata di energia necessaria al processo di produzione.

Queste considerazioni rimangono vere se valutate con lo scenario attuale ma si deve tenere in considerazione il forte aumento della potenza installata a livello globale registrato negli ultimi anni: questo porterà inevitabilmente ad un grosso aumento della quantità di rifiuti fotovoltaici prodotti nei prossimi decenni.

Il processo di riciclaggio potrà risultare così vantaggioso anche economicamente e porterà a creare sistemi specializzati e performanti dedicati esclusivamente al trattamento dei pannelli.

Attualmente infatti nel mondo sono presenti pochi centri in grado di riciclare adeguatamente i pannelli fotovoltaici e spesso questi vengono smaltiti in centri che non sono in grado di recuperare molti dei materiali presenti.

3.1 L'associazione PV Cycle

PV Cycle è un' associazione volontaria europea nata nel 2007 con sede a Bruxelles. Essa raggruppa le principali industrie europee che lavorano nel settore del fotovoltaico e ad oggi rappresenta circa l'85% del mercato FV europeo.

Il suo scopo è quello di promuovere il riciclaggio dei pannelli fotovoltaici, aumentando così la sostenibilità degli impianti fotovoltaici grazie ad una corretta gestione

dello smaltimento dei prodotti che hanno raggiunto la fine della loro vita utile. I principali produttori, importatori e rivenditori di moduli fotovoltaici d'Europa si sono così riuniti e, insieme a varie associazioni e centri di ricerca operanti in questo settore, cercano di introdurre una gestione complessiva dei rifiuti e una politica di riciclaggio volontario per creare un futuro più sostenibile.

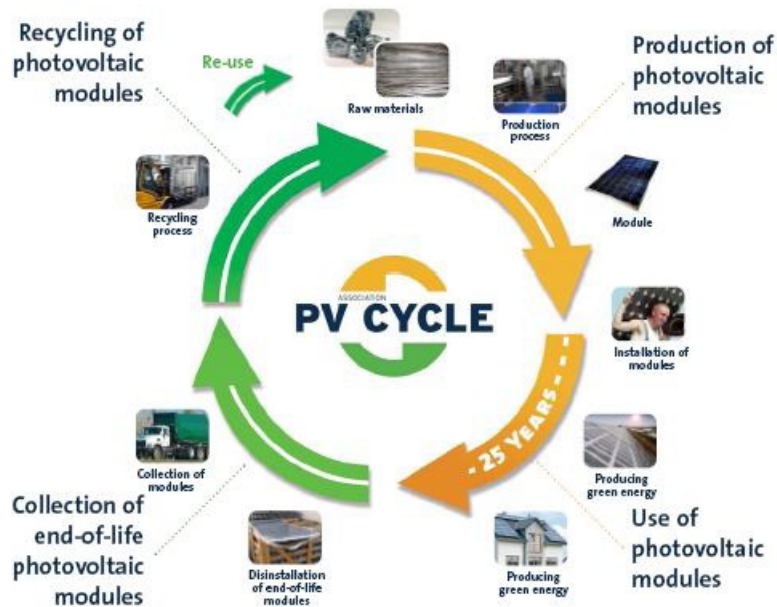


Figura 3.1: Schema logico dell'attività di Pv Cycle

3.1.1 Prime prove su impianti pilota

Il primo vero progetto e tentativo di riciclare moduli fotovoltaici è iniziato nel maggio 2009 e attuato da Pv Cycle in collaborazione con partner della provincia di Chevetogne e l'azienda di installazione elettrica Nizet.

L'impianto fotovoltaico di Chevetogne è stato uno dei primi grandi sistemi di riscaldamento solare in Europa e uno dei primi 16 impianti fotovoltaici pilota avviati e sostenuti dalla Commissione europea nel 1983.



Figura 3.2: L'impianto di Chevetogne quando era ancora in funzione

In figura 3.3 si possono invece osservare le condizioni in cui si trovavano alcuni dei moduli fotovoltaici dopo più di 25 anni di utilizzo:



Figura 3.3: Modulo fotovoltaico in cui sono evidenti i danni e l'usura fisica dei suoi componenti

Lo smaltimento è servito come esperienza di apprendimento per PV Cycle, che prevede di avere il suo sistema di riciclaggio in vigore in tutta Europa entro il 2015. Dal processo di trattamento dei circa 2000 moduli al silicio cristallino dell'impianto è stato possibile recuperare la maggior parte dei componenti presenti nei moduli: la tabella 3.1 mostra i risultati ottenuti.

| Materiali | Input per modulo [Kg] | In peso [%] | Output per modulo [%] | Recupero [%] |
|------------------------|--------------------------|----------------|--------------------------|-----------------|
| Vetro | 5,93 | 65,82 | 5,75 | 96,96 |
| Plastica(EVA,etc.) | 0,94 | 10,43 | recupero energia | - |
| Celle FV e celle 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 | recupero energia | - |
| PESO TOTALE | 9,01 | 100,00 | 7,62 | 84,57 |

Tabella 3.1: Frazioni di materiale recuperate dal singolo modulo

3.2 Processi di Riciclaggio esistenti

Per quanto riguarda le tecnologie utilizzabili nello smaltimento dei pannelli, nonostante il progetto pilota appena presentato e altri in fase di studio, attualmente solo tre sistemi per il riciclo dei pannelli fotovoltaici sono industrialmente realizzabili:

- il processo sviluppato da First Solar;
- il processo sviluppato da SolarWorld;
- il processo sviluppato da Sunicon.

3.2.1 Il processo della First Solar

Il processo sviluppato da First Solar per il riciclaggio dei pannelli al Tellururo di Cadmio (CdTe) è stato sviluppato dall'azienda statunitense per prevenire eventuali problemi ambientali legati allo smaltimento del Cadmio contenuto nei pannelli di sua produzione.

La scelta di First Solar è stata quella di farsi carico del recupero, riciclaggio e smaltimento di tutti i pannelli da loro prodotti e venduti.

Il produttore prefinanzia il riciclaggio, che avverrà qualche decina d'anni dopo la vendita al cliente, mediante il conferimento in un fondo di una parte dei proventi legati alla vendita dei pannelli: in questo modo l'azienda fornisce al cliente un servizio completo che va dalla vendita allo smaltimento, evitando così che i pannelli vengano smaltiti in modo non corretto assieme ai rifiuti solidi in discariche o inceneritori.

Mediante il processo di First Solar è possibile riciclare sia i moduli rotti che quelli ancora integri.

Esso si compone di varie fasi:

- **Ritiro:** su richiesta del cliente, First Solar fornisce i materiali di imballaggio appropriati ed effettua il ritiro dei moduli da smaltire.

Una volta giunti nello stabilimento di riciclaggio ai moduli viene tolta manualmente la cornice in alluminio per poi essere caricati ed inseriti in una frantumatrice;

- **Riduzione dimensionale:** le dimensioni dei moduli vengono ridotte mediante un processo a due stadi.

Nel primo stadio si utilizza una frantumatrice per ridurre i pannelli in pezzi piuttosto grossolani, i quali vengono poi inviati mediante un convogliatore chiuso alla fase successiva.

Nel secondo stadio un mulino a martelli frantuma ulteriormente la componente vetrosa, che rappresenta la frazione principale dei frammenti dei moduli ottenuti.

Le lastre di vetro infatti devono essere ridotte in schegge di piccole dimensioni (circa 4/5 mm), in modo da garantire la rottura del legame creato dalla procedura di laminazione.

I pezzi di modulo vengono poi inviati, mediante un convogliatore coperto, allo stadio successivo del riciclaggio.

Al fine di controllare la formazione e le emissioni di polveri dannose in tutte le fasi del processo che non comportano l'utilizzo di sostanze liquide (come in questa fase) è previsto l'impiego di un sistema di aspirazione dotato di un filtro antiparticolato ad elevata efficienza (HEPA), che consente di rimuovere dall'aria le particelle solide presenti in sospensione;

- **Rimozione del film semiconduttore:** i frammenti ottenuti vengono inseriti per circa 4/6 ore in un tamburo di acciaio inossidabile a rotazione lenta in cui viene aggiunto dell'acido solforico diluito e del perossido di idrogeno fino a quando non si ottiene un rapporto solido-liquido ottimale.

Ha luogo in questa maniera un processo di lisciviazione (leaching) che permette di rimuovere il film semiconduttore mediante un attacco chimico;

- **Separazione solido-liquido:** il contenuto del tamburo viene versato lentamente in un dispositivo separatore per procedere alla separazione delle parti in vetro da quelle liquide.

La frazione solida, composta per lo più da frammenti di vetro e pezzi di EVA, viene trasportata lungo un piano inclinato da una vite rotante, i liquidi invece rimangono sul fondo del separatore per poi essere drenati verso l'unità di precipitazione.

A questo punto quindi il processo si divide in due percorsi differenti: uno per la frazione solida e l'altro per la frazione liquida ad elevato contenuto di metalli;

- **(Frazione solida) Separazione del vetro dall'EVA:** il materiale vetroso viene separato dall'incapsulante (EVA) mediante un setaccio industriale. I pezzi di EVA, essendo di maggiori dimensioni, si muovono lungo la parte superiore grazie ad un'azione vibrante e si raccolgono su di un piccolo convogliatore attraverso il quale sono poi fatti uscire. La frazione vetrosa invece, avendo dimensioni più piccole, non riesce ad attraversare la superficie vagliante e così cade verso il basso attraverso le maglie del setaccio. In questo modo quindi è possibile separare le due frazioni solide e il vetro può essere inviato alla fase successiva di risciacquo.
- **(Frazione solida) Risciacquatura del vetro:** il vetro viene depositato su di un nastro trasportatore strettamente intrecciato che avanza lentamente nel frattempo che il materiale è sottoposto a risciacquatura. L'acqua impiegata per il lavaggio rimuove dal vetro gli eventuali residui di film semiconduttore e poi fuoriesce dalla parte inferiore del nastro: in questa maniera il vetro ripulito viene imballato ed inviato al riciclaggio mentre l'acqua di risciacquo viene pompata verso il sistema di precipitazione per il recupero dei metalli;
- **(Frazione liquida) Precipitazione:** i liquidi con un elevato contenuto di metalli, provenienti dalla fase della separazione solido-liquida e della risciacquatura del vetro, sono pompati nel dispositivo di precipitazione. I composti metallici vengono così sottoposti ad un processo di precipitazione articolato in tre fasi con valori di pH crescenti;
- **(Frazione liquida) Idroestrazione:** i materiali precipitati vengono concentrati in una vasca di ispessimento dove i solidi vengono fatti depositare sul fondo mentre l'acqua chiarificata viene pompata via. Il materiale ispessito viene in seguito pompato verso una filtropressa che consente di eliminare l'acqua in eccesso. L'agglomerato filtrato risultante, che presenta un elevato contenuto metallico (cadmio e tellurio), viene imballato ed inviato ad un fornitore esterno per essere raffinato ed utilizzato per la produzione del materiale semiconduttore da impiegare nella costruzione di nuovi moduli.

Il processo è fortemente standardizzato ed è stato replicato in tutti gli stabilimenti di First Solar, compreso quello di Frankfurt Oder in Germania che ad oggi gestisce gli scarti industriali e i pannelli che raggiungono una fine di vita prematura installati in Europa.

Mediante questo processo è possibile recuperare il 90% del vetro, utilizzabile per

nuovi prodotti, e il 95% del materiale semiconduttore per l'utilizzo in nuovi pannelli.

Lo schema in figura 3.4 rappresenta il processo appena descritto:

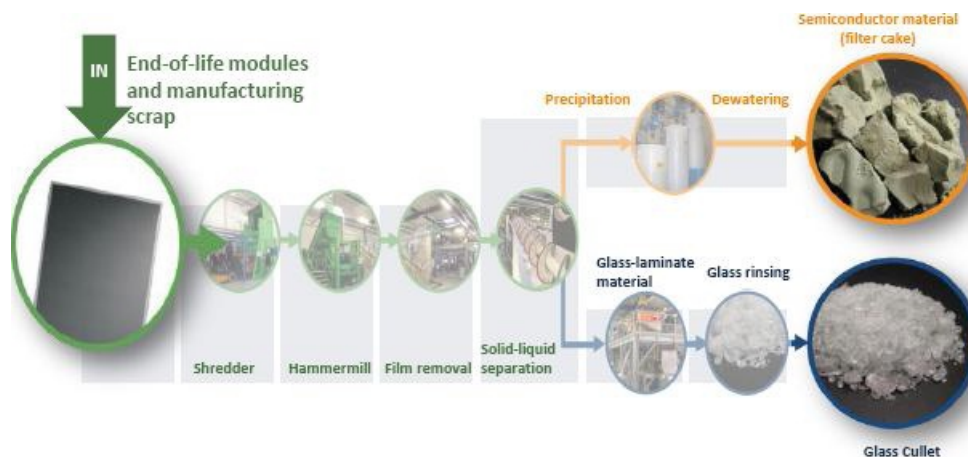


Figura 3.4: Processo di riciclaggio della First Solar

3.2.2 Il processo della Deutsche Solar

Questo processo è stato sviluppato nel 2003 come processo pilota dalla Deutsche Solar, una filiale della ditta SolarWorld.

Inizialmente era nato con lo scopo di recuperare i soli wafer intatti dai moduli al silicio cristallino giunti a fine vita utile ed era stato presentato per fornire un valido esempio di riciclaggio di alto valore, nel tempo però è stato modificato in seguito all'insorgere di alcune problemi di natura tecnica.

Poichè oggi gli spessori delle celle sono molto più sottili rispetto al passato ($<200 \mu m$), l'obiettivo iniziale di recuperare i wafer intatti è stato abbandonato, focalizzando l'interesse principalmente sul recupero del silicio come materia prima anche da moduli con celle danneggiate.

In figura 3.5 si osserva lo schema originale della soluzione presentata da Deutsche Solar (si nota infatti che le celle rotte venivano scartate):

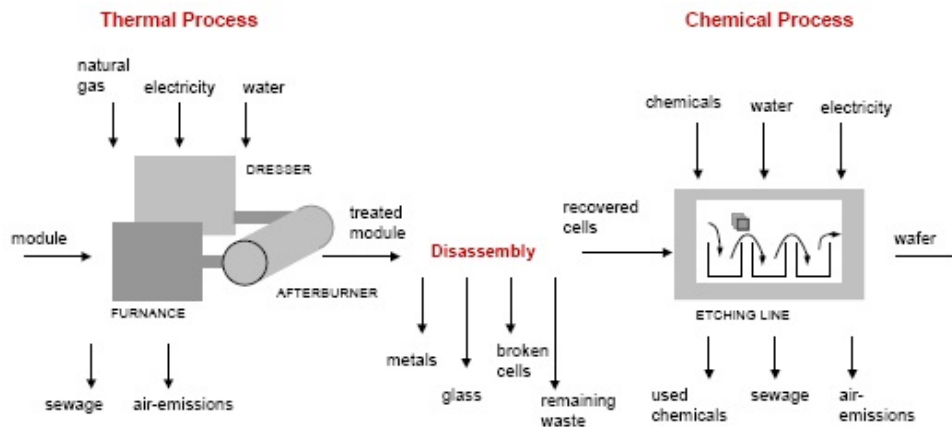


Figura 3.5: Processo di riciclaggio originario della Deutsche Solar

Il processo modificato presenta due fasi principali:

- **Trattamento termico:** i moduli vengono messi in un forno di incenerimento dove i componenti plastici (EVA e il foglio polimerico di Tedlar) bruciano ad una temperatura di 550/600 °C.

Il materiale incapsulante dunque si decompone insieme alle altre sostanze polimeriche: la struttura a "sandwich" si separa nei suoi componenti.

I gas generati dalla combustione (contenenti composti organici derivanti dalla decomposizione dei materiali polimerici) vengono trattati in un post-combustore e successivamente purificati mediante un sistema di abbattimento delle sostanze inquinanti.

Dopo il disassemblaggio la cornice, il vetro e le celle vengono separati manualmente: i primi due sono inviati al riciclaggio e integrati nei rispettivi cicli dei materiali, le celle di silicio invece vengono trattate mediante un processo chimico.



Figura 3.6: Celle cristalline frantumate

- **Trattamento chimico:** consiste nel recuperare le fette di silicio rimuovendo dalle celle fotovoltaiche in modo sequenziale e selettivo gli strati di materiali che rivestono il wafer (lo strato di metallizzazione superiore e anteriore, lo strato di rivestimento antiriflettente, nonché la giunzione p-n).

Tali operazioni si effettuano con una serie di bagni e attacchi chimici (etching) che utilizzano diversi composti (acido fluoridrico, acido nitrico, acido acetico, perossido di idrogeno, acqua distillata, etc.) i quali aggrediscono la superficie della cella sciogliendo così la base di silicio, cioè il wafer, che potrà poi essere reimpiegato nella produzione di nuove celle.

Ciò garantisce un notevole risparmio energetico, dato che in questo modo si evita di dover produrre il wafer a partire dalla materia prima vergine.

Gli strati che ricoprono la fetta di silicio devono essere rimossi in maniera altamente selettiva se si vuole garantire che lo spessore della base si conservi il più possibile, evitando quindi un'eccessiva perdita di silicio e riducendo di conseguenza le probabilità di rottura delle fette durante il processo di riciclaggio.

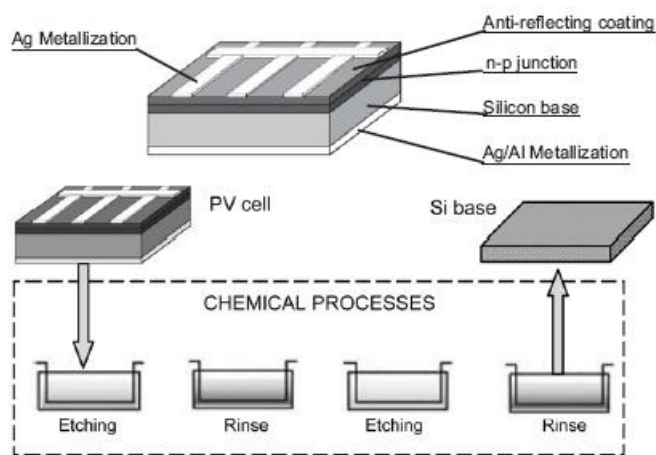


Figura 3.7: Trattamento chimico nel processo della Deutsche Solar

Un limite di questo processo è l'alto tasso di manualità presente nel ciclo produttivo: questo ne limita i vantaggi economici e anche i ritmi di produzione.

3.2.3 Il processo della Sunicon

I vantaggi dati dal processo di Deutsche Solar possono essere quindi incrementati ancora aumentando il livello di automazione del sistema di riciclaggio stesso: è quello che è stato studiato da Sunicon, un'altra sussidiaria di SolarWorld.

Lo schema generale è visibile in figura 3.8:

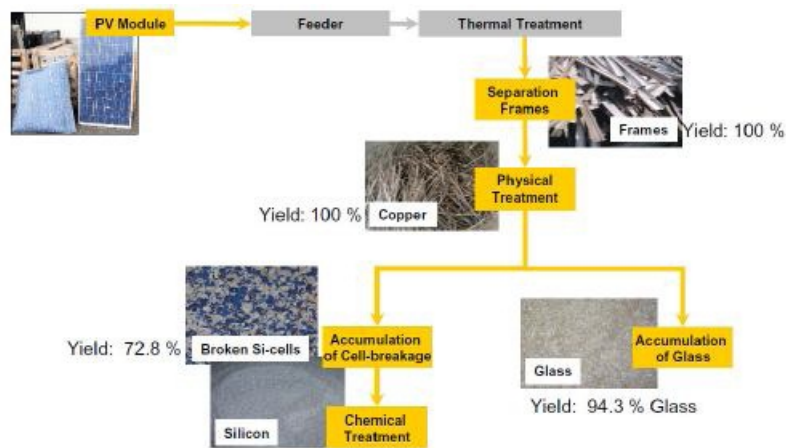


Figura 3.8: Processo di riciclaggio di Sunicon

I moduli fotovoltaici vengono introdotti nel sistema di trattamento termico mediante un sistema automatico di alimentazione (feeder): durante questo stadio ha luogo la decomposizione dei materiali organici presenti, quelli che servono principalmente a mantenere uniti i diversi strati del pannello.

La fase termica è seguita da una separazione meccanica delle bandelle di rame e dei segmenti che formano la cornice di alluminio dal resto dei materiali: date le loro dimensioni infatti, questi componenti possono essere rimossi e recuperati completamente.

Successivamente una serie di trattamenti fisici (frantumazione, separazione gravitazionale per densità, . . .) consente di rimuovere i materiali indesiderati e di separare il vetro dai frammenti delle celle solari rotte, le quali saranno sottoposte ad un ultimo trattamento chimico necessario a recuperare il silicio.



Figura 3.9: Silicio frantumato in polvere

A differenza dell'impianto pilota la separazione delle celle, del vetro e delle bande di interconnessione avviene automaticamente e non manualmente, risultando molto meno onerosa.

Attraverso il sistema sviluppato da Sunicon infatti si riuscirà a riciclare complessivamente per ciascun modulo una percentuale in massa pari al 95,7%.

Il rendimento di recupero complessivo per pannello risulterebbe quindi notevolmente superiore a quello conseguito dall'impianto pilota per i pannelli del generatore di Chevetogne (circa 85%).

Sunicon stima che il sistema automatizzato sarà in grado di ottenere un elevato grado di purezza delle singole frazioni di materiali recuperate.

In questo modo infatti, secondo l'impresa, si può recuperare:

- il 94,3% in peso della frazione vetrosa con purezza al 99,99975%;
- il 73% della frazione di silicio corrispondente alle celle solari: di questa quota, il 59% avrebbe una purezza del 99,9999% e il restante 41% sarebbe puro al 99,995%.

Il rimanente 5,7% della componente vetrosa andrebbe persa nella frazione di materiali misti mentre la frazione delle celle solari che non può essere riciclata ammonterebbe al 27%.

In definitiva solo il 4,3% in peso del modulo, corrispondente alla somma delle frazioni finissime e di quelle indesiderate, non verrebbe recuperato.

3.3 Sviluppi per il futuro: l'approccio "Cradle to Cradle"

Nella vita di un impianto fotovoltaico non si devono considerare solamente i vantaggi ambientali ed economici legati alla produzione di energia elettrica "pulita" ma si devono tenere in considerazione anche gli impatti ambientali associati a tutte le fasi del ciclo di vita del sistema prodotto, dall'estrazione delle materie prime allo smaltimento finale.

L'obiettivo diventa pertanto quello di minimizzare il carico ambientale complessivo, evitando che le iniziative incentrate su singole fasi del ciclo di vita si limitino semplicemente a trasferire tale carico su altre fasi.

Lo sviluppo e l'adozione di tecniche di "riciclaggio di elevato valore" nell'ambito della gestione dell' "end of life" consentirebbe di chiudere in maniera virtuosa il ciclo di vita di questi dispositivi, approdando così da un approccio di tipo "dalla culla alla tomba" (from cradle to grave) ad uno di tipo "dalla culla alla culla" (from cradle to

cradle) attraverso cui i materiali e i componenti recuperati dai moduli a fine vita vengono reintrodotti in un nuovo ciclo di produzione dello stesso bene, ottenendo così un notevole risparmio energetico.

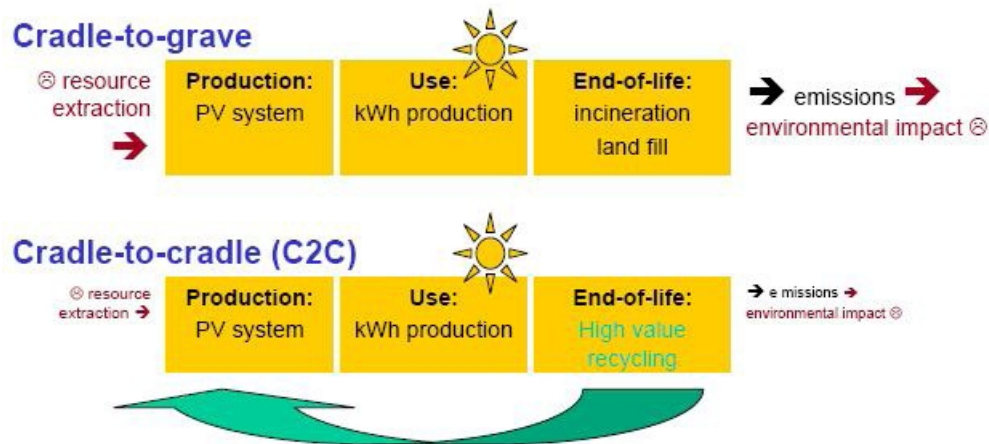


Figura 3.10: Dall'approccio "Cradle to grave" a quello "Cradle to Cradle"

Il principio del "cradle to cradle" considera i rifiuti come "alimenti": il prodotto giunto a fine vita pertanto è visto come il punto di partenza di un nuovo ciclo produttivo.

In tale maniera si riduce la quantità di rifiuti destinati alla discarica o all'incenerimento, abbandonando il modello attuale di produzione.

Al momento infatti la linea produttiva impone il fatto che quando si arriva alla fine i prodotti vengono eliminati e sepolti in una qualche genere di "tomba" (discarica, inceneritore, ...) dove il loro valore va perduto per sempre.

Il riciclaggio evita un simile spreco di risorse: affinché esso risulti davvero efficace però, risulta necessario implementare un simile approccio sin dalla fase di progetto del sistema-prodotto, progettando cioè i moduli fotovoltaici in maniera funzionale al riciclaggio.

In questo modo l'industria fotovoltaica sarebbe in grado di garantire che le odierne soluzioni ai cambiamenti climatici non costituiranno un problema di gestione dei rifiuti per le generazioni future, diventando così realmente sostenibile.

Capitolo 4

POSSIBILI SCENARI E POLITICHE DI SOSTEGNO

Come si è visto nel capitolo precedente risulta dunque evidente che gli impatti negativi dati dalla fine vita dei moduli fotovoltaici possono essere ridotti notevolmente da un loro processo di riciclaggio.

Per i prossimi anni è possibile fare una stima dei vantaggi economici, sociali ed ambientali derivanti da questo processo: è necessario però valutare tutti i vantaggi possibili raffrontandoli con le diverse politiche economiche di sostegno e i diversi scenari possibili.

Gli scenari e le politiche possibili e presi in considerazione per i prossimi anni sono 4:

- **Scenario A: "Worst Case"**
- **Scenario B: "Voluntary Action"**
- **Politica A: "Residential PV included in the scope of the WEEE directive"**
- **Politica B: "All PV included in the scope of the WEEE directive"**

Si vedranno ora in dettaglio quali ipotesi li caratterizzano e le differenze tra uno e l'altro.

4.1 Scenario A: "Worst Case"

In questo scenario si considera il peggior caso possibile: il trattamento dei moduli fotovoltaici a fine vita non sarà ancora diretto da alcuna normativa e inoltre nessun metodo di riciclaggio sarà attivo.

Si va a configurare quindi un possibile futuro in cui tutti i rifiuti prodotti saranno trattati in maniera inadeguata e non ci sarà alcun recupero di materie prime.

La figura 4.1 mostra i rifiuti previsti (in milioni di tonnellate) nel corso dei prossimi anni valutandoli con riferimento allo scenario A:

| Tipo di modulo | a. Quantità di rifiuti generati [milioni ton] | | | b. Percentuale di riciclaggio [%] | | | c. Rifiuti trattati e riciclati [milioni ton] c= a*b | | | d. Rifiuti non trattati e non riciclati [milioni ton] d= a-c | | |
|-----------------|---|------|------|-----------------------------------|------|------|---|------|------|---|------|------|
| | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 |
| <i>c-Si</i> | 0,20 | 2,00 | 4,21 | 0% | 0% | 0% | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,20 | 2,00 | 4,21 |
| <i>a-Si</i> | 0,02 | 0,33 | 1,57 | 0% | 0% | 0% | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,33 | 1,57 |
| <i>CdTe</i> | 0,01 | 0,79 | 1,49 | 0% | 0% | 0% | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,79 | 1,49 |
| <i>CIGS/CIS</i> | 0,00 | 0,05 | 1,89 | 0% | 0% | 0% | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 1,89 |
| TOTALE | 0,22 | 3,18 | 9,16 | 0% | 0% | 0% | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,22 | 3,18 | 9,16 |

Figura 4.1: Scenario A:Percentuali di riciclaggio e rifiuti trattati

4.2 Scenario B: "Voluntary Action"

In questo scenario i pannelli fotovoltaici sono considerati ancora non rientranti nelle direttive WEEE.

A differenza dello "scenario A" però vengono considerati attivi in futuro i sistemi di riciclaggio che sono disponibili al momento: si considera infatti una percentuale di riciclaggio pari alla quantità di rifiuti fotovoltaici prodotti attualmente.

La figura 4.2 mostra i rifiuti previsti (in milioni di tonnellate) nel corso dei prossimi anni valutandoli con riferimento allo scenario B:

| Tipo di modulo | a. Quantità di rifiuti generati [milioni ton] | | | b. Percentuale di riciclaggio [%] | | | c. Rifiuti trattati e riciclati [milioni ton] <small>c= a*b</small> | | | d. Rifiuti non trattati e non riciclati [milioni ton] <small>d= a-c</small> | | |
|-----------------|---|-------------|-------------|-----------------------------------|------------|------------|--|-------------|-------------|--|-------------|-------------|
| | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 |
| <i>c-Si</i> | 0,20 | 2,00 | 4,21 | 20% | 25% | 30% | 0,04 | 0,50 | 1,26 | 0,16 | 1,50 | 2,95 |
| <i>a-Si</i> | 0,02 | 0,33 | 1,57 | 20% | 25% | 30% | 0,00 | 0,08 | 0,47 | 0,01 | 0,25 | 1,10 |
| <i>CdTe</i> | 0,01 | 0,79 | 1,49 | 20% | 25% | 30% | 0,00 | 0,20 | 0,45 | 0,01 | 0,59 | 1,04 |
| <i>CIGS/CIS</i> | 0,00 | 0,05 | 1,89 | 0% | 0% | 0% | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 1,89 |
| TOTALE | 0,22 | 3,18 | 9,16 | 18% | 25% | 24% | 0,04 | 0,78 | 2,18 | 0,18 | 2,39 | 6,98 |

Figura 4.2: Scenario B:Percentuali di riciclaggio e rifiuti trattati

Per i pannelli di tipo c-Si, a-Si e CdTe sono state considerate percentuali di riciclaggio crescenti, dal 20% nel 2030 fino al 30% nel 2050.

Per i pannelli al CIS/CIGS invece è stata considerata una percentuale di riciclo uguale al 0% poichè non si conosce il loro futuro sviluppo commerciale e inoltre al momento non sono state sviluppate delle loro tecniche di riutilizzo.

4.3 Politica A: "Residential PV included in the scope of the WEEE directive"

In questa politica si considera che in futuro vengano inclusi nelle direttiva WEEE tutti i rifiuti provenienti da installazioni fotovoltaiche private, cioè quelle di tipo residenziale.

Le applicazioni residenziali e commerciali sono considerate pari rispettivamente all'86% e al 14% del mercato totale.

In figura 4.3 è possibile osservare i rifiuti previsti (in milioni di tonnellate) nel corso dei prossimi anni valutandoli con riferimento alla politica A (separati in applicazioni residenziali e commerciali):

| Tipo di modulo | a. Quantità di rifiuti generati [milioni ton] | | | b. Percentuale di riciclaggio [%] | | | c. Rifiuti trattati e riciclati [milioni ton] c= a*b | | | d. Rifiuti non trattati e non riciclati [milioni ton] d= a-c | | |
|-----------------|---|------|------|-----------------------------------|------|------|---|------|------|---|------|------|
| | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 |
| <i>c-Si</i> | 0,17 | 1,72 | 3,62 | 85% | 85% | 85% | 0,14 | 1,46 | 3,08 | 0,03 | 0,26 | 0,54 |
| <i>a-Si</i> | 0,02 | 0,29 | 1,35 | 85% | 85% | 85% | 0,01 | 0,24 | 1,15 | 0,002 | 0,04 | 0,20 |
| <i>CdTe</i> | 0,01 | 0,68 | 1,28 | 85% | 85% | 85% | 0,01 | 0,58 | 1,09 | 0,001 | 0,10 | 0,19 |
| <i>CIGS/CIS</i> | 0,00 | 0,04 | 1,63 | 85% | 85% | 85% | 0,00 | 0,03 | 1,39 | 0,00 | 0,01 | 0,24 |
| TOTALE | 0,19 | 2,73 | 7,88 | 85% | 85% | 85% | 0,16 | 2,32 | 6,70 | 0,03 | 0,41 | 1,18 |

Installazioni residenziali

Installazioni commerciali

| Tipo di modulo | a. Quantità di rifiuti generati [milioni ton] | | | b. Percentuale di riciclaggio [%] | | | c. Rifiuti trattati e riciclati [milioni ton] c= a*b | | | d. Rifiuti non trattati e non riciclati [milioni ton] d= a-c | | |
|-----------------|---|------|------|-----------------------------------|------|------|---|------|------|---|------|------|
| | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 |
| <i>c-Si</i> | 0,03 | 0,28 | 0,59 | 20% | 25% | 30% | 0,01 | 0,07 | 0,18 | 0,02 | 0,21 | 0,41 |
| <i>a-Si</i> | 0,002 | 0,05 | 0,22 | 20% | 25% | 30% | 0,0005 | 0,01 | 0,07 | 0,002 | 0,04 | 0,15 |
| <i>CdTe</i> | 0,001 | 0,11 | 0,21 | 20% | 25% | 30% | 0,0002 | 0,03 | 0,06 | 0,001 | 0,08 | 0,15 |
| <i>CIGS/CIS</i> | 0,00 | 0,01 | 0,27 | 0% | 0% | 0% | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,27 |
| TOTALE | 0,03 | 0,44 | 1,28 | 20% | 25% | 24% | 0,006 | 0,11 | 0,31 | 0,02 | 0,34 | 0,98 |

Figura 4.3: Politica A: Previsioni di percentuali di riciclaggio nelle applicazioni residenziali (sopra) e commerciali (sotto)

4.3. POLITICA A: "RESIDENTIAL PV INCLUDED IN THE SCOPE OF THE WEEE DIRECTIVE"

Si può vedere come per le installazioni residenziali viene considerata una percentuale di riciclaggio pari all' 85% per tutte le tecnologie di moduli (c-Si, a-Si, CdTe, CIGS e CIS).

Per quanto riguarda invece le installazioni commerciali ed industriali vengono assunte le stesse percentuali considerate nello "scenario B", considerando dunque un tasso di riciclaggio:

- crescente dal 20% del 2030 al 30% del 2050 per i moduli al c-Si, a-Si e CdTe;
- pari allo 0% per i moduli al CIGS e CIS. Si può quindi tracciare un quadro generale considerando tutte le applicazioni, delineando l'andamento generale previsto con la "politica A":

| Tipo di modulo | Quantità totali di rifiuti generati [milioni ton] | | | Rifiuti totali, trattati e riciclati [milioni ton] | | | Rifiuti totali, non trattati e non riciclati [milioni ton] | | |
|-----------------|---|-------------|-------------|--|-------------|-------------|--|-------------|-------------|
| | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 |
| <i>c-Si</i> | 0,20 | 2,00 | 4,21 | 0,15 | 1,53 | 3,25 | 0,05 | 0,47 | 0,96 |
| <i>a-Si</i> | 0,02 | 0,33 | 1,57 | 0,01 | 0,26 | 1,21 | 0,004 | 0,08 | 0,36 |
| <i>CdTe</i> | 0,01 | 0,79 | 1,49 | 0,01 | 0,61 | 1,15 | 0,002 | 0,19 | 0,34 |
| <i>CIGS/CIS</i> | 0,00 | 0,05 | 1,89 | 0,00 | 0,03 | 1,39 | 0,00 | 0,01 | 0,51 |
| TOTALE | 0,22 | 3,18 | 9,16 | 0,17 | 2,43 | 7,00 | 0,05 | 0,74 | 2,16 |

Figura 4.4: Politica A: Previsioni di percentuali di riciclaggio totali

4.4 Politica B: "All PV included in the scope of the WEEE directive"

In questa politica si considera che in futuro vengano inclusi nella direttiva WEEE tutti i rifiuti generati, includendo quindi anche le installazioni fotovoltaiche di tipo commerciale.

Viene considerata quindi una percentuale di riciclaggio pari all' 85% per tutte le tecnologie di moduli (c-Si,a-Si,CdTe,CIGS e CIS).

Si va a delineare così la situazione rappresentata in figura 4.5 :

| Tipo di modulo | a. Quantità totali di rifiuti generati [milioni ton] | | | b. Percentuale di riciclaggio [%] | | | c. Rifiuti trattati e riciclati [milioni ton] c= a*b | | | d. Rifiuti non trattati e non riciclati [milioni ton] d= a-c | | |
|-----------------|--|-------------|-------------|-----------------------------------|------------|------------|---|-------------|-------------|---|-------------|-------------|
| | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 | 2030 | 2040 | 2050 |
| <i>c-Si</i> | 0,20 | 2,00 | 4,21 | 85% | 85% | 85% | 0,17 | 1,70 | 3,58 | 0,03 | 0,30 | 0,63 |
| <i>a-Si</i> | 0,02 | 0,33 | 1,57 | 85% | 85% | 85% | 0,02 | 0,28 | 1,33 | 0,003 | 0,05 | 0,24 |
| <i>CdTe</i> | 0,01 | 0,79 | 1,49 | 85% | 85% | 85% | 0,01 | 0,67 | 1,27 | 0,001 | 0,12 | 0,22 |
| <i>CIGS/CIS</i> | 0,00 | 0,05 | 1,89 | 85% | 85% | 85% | 0,00 | 0,04 | 1,61 | 0,00 | 0,01 | 0,28 |
| TOTALE | 0,22 | 3,18 | 9,16 | 85% | 85% | 85% | 0,19 | 2,70 | 7,79 | 0,03 | 0,48 | 1,37 |

Figura 4.5: Politica B:Previsioni di percentuali di riciclaggio

Capitolo 5

IPOTESI PRELIMINARI

Al fine di fare un'analisi economica globale del processo di riciclaggio è necessario fare delle ipotesi preliminari e dare dei parametri di riferimento per poter valutare correttamente tutti i dati ottenuti.

Nel corso di questo capitolo si analizzeranno vari aspetti, quali:

- la **crescita del mercato fotovoltaico**
- la **quantità di rifiuti generati**
- gli **impatti ambientali**
- gli **impatti economici**
- gli **impatti sociali**

5.1 Crescita del mercato fotovoltaico

La previsione dell'andamento del mercato del fotovoltaico risulta molto utile ai fini di prevedere i moduli che saranno in funzione nei prossimi anni.

Sono stati ipotizzati tre possibili scenari di andamento della quantità delle installazioni fotovoltaiche:

- ” **Baseline** ”:
è lo scenario di base, prevede una penetrazione di fotovoltaico in Europa pari al 4% della domanda complessiva di elettricità entro il 2020 e di oltre il 5% in Italia;
- ” **Accelerated** ”:
è lo scenario di crescita accelerata, che punta a coprire il 6% del mercato elettrico europeo e oltre l'8% di quello italiano, richiedendo modifiche minime al

sistema elettrico esistente, l'ottimizzazione della filiera produttiva e distributiva, una maggiore cooperazione con gli operatori di rete ed un'offerta trainante di prodotti e servizi;

- ” **Paradigm shift** ”:

è lo scenario più ottimista, mira ad un obiettivo del 12% assumendo che, oltre alle precedenti condizioni, vi sia utilizzo delle innovative ”smart grid” ed una vasta implementazione dei meccanismi di stoccaggio dell'energia.

L'ultima ipotesi, non solo fortemente auspicabile ma anche concretamente realizzabile, indica che il fotovoltaico entro il 2020 potrebbe soddisfare, fronte ad una situazione attuale di poco inferiore all'1%, il 12% della domanda di elettricità dell'Unione Europea e divenire una fonte di energia competitiva sino a coprire il 76% del mercato elettrico europeo.

Tutto questo a patto che vi sia una maggiore flessibilità del sistema di generazione e distribuzione dell'elettricità, in grado di rendere possibile una grande penetrazione dell' energia fotovoltaica, schemi di supporto stabili e sostenibili durante il periodo ”pre-competitivo” in grado di assicurare uno sviluppo sostenuto e sostenibile del mercato e dell'industria.

L'andamento delle installazioni fotovoltaiche in base ai vari scenari previsti è visibile in figura 5.1:

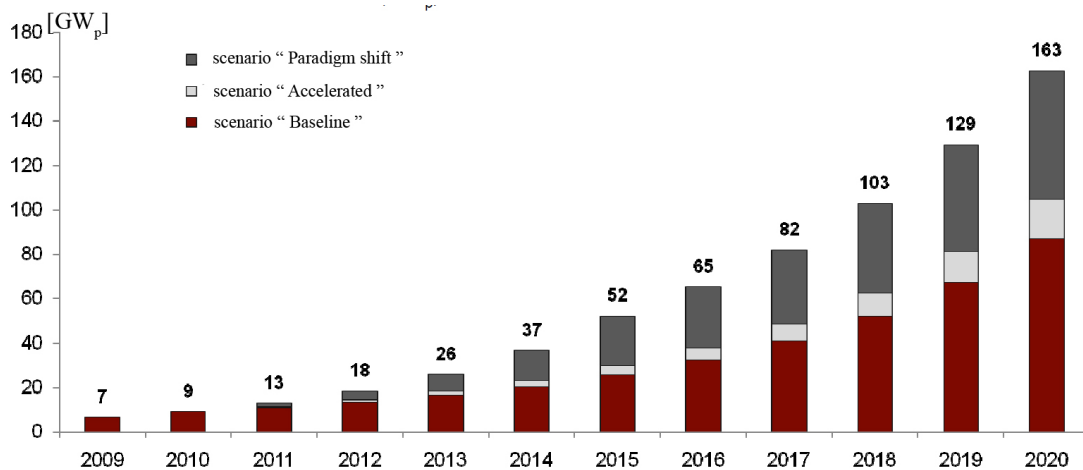


Figura 5.1: Crescita del mercato nei tre scenari possibili considerati

Tasso di crescita considerato

Per l'analisi effettuata in questa tesi si è considerata una crescita del mercato corrispondente alla media tra gli scenari "Baseline" e " Paradigm shift", come mostrato in figura 5.2:

| | paradigm shift scenario | accelerated scenario | media (%) |
|------|-------------------------|----------------------|---------------|
| 2025 | 11% | 14% | 12,50% |
| 2030 | 9% | 10% | 9,50% |
| 2035 | 7% | 7% | 7,00% |
| 2040 | 5% | 6% | 5,50% |
| 2050 | 4% | 4% | 4,00% |

Figura 5.2: Crescita del mercato considerata

In figura 5.3 è possibile invece vedere la suddivisione del mercato fotovoltaico in base alle differenti tecnologie:

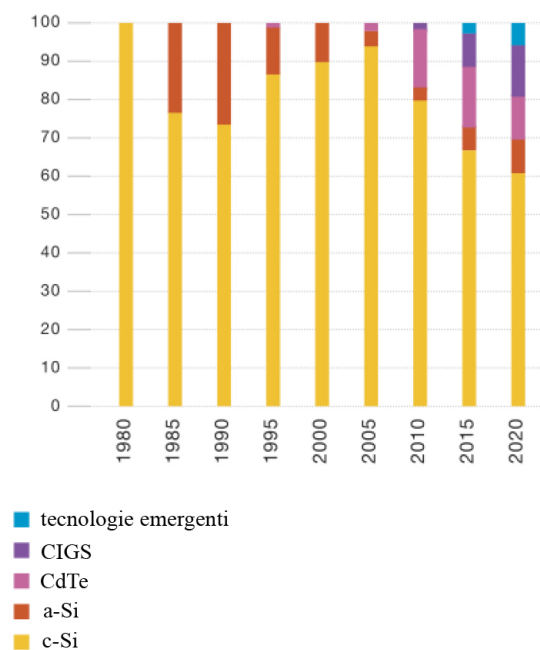


Figura 5.3: Andamento del mercato in base alle varie tecnologie

5.2 Quantità di rifiuti generati

L'aumento del mercato fotovoltaico ha come conseguenza principale un corrispondente aumento dei rifiuti generati.

La vita utile per un modulo fotovoltaico, come descritto precedentemente, è stata considerata in media pari a 25 anni.

Si nota così che la colonna dei rifiuti generati presenta uno "slittamento" temporale dei dati nei confronti di quello delle nuove installazioni pari proprio al periodo di vita del modulo.

Tutto ciò è osservabile in figura 5.4 :

| Anno [N] | Potenza totale installata [MW] <i>[a]</i> | Potenza annua installata [MW] <i>[b] = [a(N) - a (N-1)]</i> | Rifiuti generati [MW] |
|-------------|---|---|--------------------------|
| 2000 | 188 | 188 | 0 |
| 2005 | 2221 | 2033 | 0 |
| 2010 | 25509 | 23288 | 0 |
| 2015 | 54377 | 28868 | 0 |
| 2020 | 84376 | 29999 | 0 |
| 2025 | 152048 | 67672 | 188 |
| 2030 | 239360 | 87312 | 2033 |
| 2035 | 335715 | 96355 | 23288 |
| 2040 | 438766 | 103051 | 28868 |
| 2045 | 533826 | 95060 | 29999 |
| 2050 | 649481 | 115655 | 67672 |

Figura 5.4: Installazioni globali, nuove installazioni e rifiuti generati nel corso degli anni

Ripartizione dei rifiuti in base alla tecnologia

Per ottenere la suddivisione dei rifiuti creati in base al tipo di tecnologia utilizzata si devono considerare due aspetti:

- la suddivisione del mercato nelle varie tecnologie
- il peso medio di ogni modulo

La **suddivisione del mercato** può essere analizzata dalla figura 5.5:

| Anno installazione | Anno dismissione | Ripartizione in base alla tecnologia [%] | | | | |
|--------------------|------------------|--|------|------|------|------------------|
| | | c-Si | a-Si | CdTe | CIGS | nuove tecnologie |
| 2000 | 2025 | 0,9 | 0,1 | | | |
| 2005 | 2030 | 0,95 | 0,03 | 0,02 | | |
| 2010 | 2035 | 0,8 | 0,02 | 0,17 | 0,01 | |
| 2015 | 2040 | 0,68 | 0,04 | 0,18 | 0,08 | 0,02 |
| 2020 | 2045 | 0,61 | 0,08 | 0,11 | 0,14 | 0,06 |
| 2025 | 2050 | 0,61 | 0,08 | 0,11 | 0,14 | 0,06 |

Figura 5.5: Ripartizione del mercato per tecnologia

Il **peso medio di ogni modulo** è analizzabile valutando invece la figura 5.6:

| Tecnologia | Peso medio [Kg/W] |
|------------------|-------------------|
| c-Si | 0,102 |
| a-Si | 0,29 |
| CdTe | 0,2 |
| CIGS | 0,2 |
| nuove tecnologie | 0,1 |

Figura 5.6: Peso specifico delle varie tecnologie

Considerate queste due informazioni dunque è possibile calcolare il volume dei rifiuti generati dai diversi tipi di modulo in commercio:

| Anno installazione | Anno dismissione | Ripartizione in base alla tecnologia [ton] | | | | | Totale [ton] |
|--------------------|------------------|--|---------|---------|---------|------------------|--------------|
| | | c-Si | a-Si | CdTe | CIGS | nuove tecnologie | |
| 2000 | 2025 | 17258 | 5452 | | | | 22710 |
| 2005 | 2030 | 196998 | 17687 | 8132 | | | 222817 |
| 2010 | 2035 | 1900301 | 135070 | 791792 | 46576 | | 2873739 |
| 2015 | 2040 | 2002284 | 334869 | 1039248 | 461888 | 57736 | 3896025 |
| 2020 | 2045 | 1866538 | 695977 | 659978 | 839972 | 179994 | 4242459 |
| 2025 | 2050 | 4210570 | 1569997 | 1488790 | 1894824 | 406034 | 9570215 |

Figura 5.7: Ripartizione dei rifiuti per tecnologia

Esempio di calcolo (c-Si nel 2025):

$$188 * 10^6 W * 0,9 * 0,102 Kg/W = 17.258 tonnellate$$

5.3 Impatti Ambientali

I rifiuti generati dall'industria fotovoltaica, se non verranno trattati in maniera adeguata, causano problemi e avere degli impatti negativi sull'ambiente e quindi sulla salute dell'uomo.

I potenziali rischi ambientali sono associati a:

- presenza di piombo;
- presenza di cadmio;
- perdita di risorse primarie (alluminio e vetro);
- perdita di metalli rari (argento, indio, gallio, germanio).

5.3.1 Rischi ambientali

I pannelli fotovoltaici contengono piccole quantità di cadmio e piombo, sostanze pericolose per l'essere umano e per l'ambiente.

Nonostante questi due elementi abbiano un contenuto percentuale in peso in ogni modulo inferiore all' 1% essi presentano un elevato grado di tossicità e di rischio.

Il **Piombo** viene utilizzato principalmente nei pannelli al silicio cristallino: è contenuto nello stagno con cui le celle solari sono legate ed è una componente della pasta d'argento usata nel processo di metallizzazione.

E' un metallo pesante con un alto potenziale di accumulo nell'ambiente e nell'essere umano: una volta entrato a contatto con il corpo umano si distribuisce in questo tramite la circolazione sanguigna, accumulandosi nei tessuti e nelle ossa.

A seconda della percentuale in cui è presente risulta essere molto pericoloso e può causare problemi cardiovascolari, ai reni, al sistema immunitario e all'apparato nervoso.

Nell'ambiente in cui si diffonde invece può causare una perdita di biodiversità, una diminuzione del tasso di sviluppo ed effetti nocivi su animali e piante.

Il **Cadmio** è utilizzato maggiormente nei moduli a film sottile al CdTe ma viene impiegato anche come sostanza "riempitiva" tra i diversi strati nei moduli al CIGS. Esposizioni a livelli anche bassi di questo elemento possono portare a malattie gravi. E' un metallo pesante come il piombo e ha un tasso di accumulo nel corpo umano molto elevato, con un tempo di smaltimento medio di circa 30 anni.

Valutazione economica

Nella figura 5.8 si possono vedere i costi "esterni" e la valutazione economica per i due componenti.

I costi esterni rappresentano una quantificazione economica degli impatti ambientali dovuti alla non corretta gestione delle due sostanze pericolose in questione: per la valutazione sono state considerate le emissioni pericolose in aria e l'inquinamento del suolo dovuto a queste due sostanze. La valutazione economica invece esprime la quantificazione monetaria dei danni causati alla sola salute umana dovuti al rilascio nell'ambiente di queste due sostanze.

| | Quantità contenuta | Peso del modulo | Quantità per modulo | Costo esterno per Kg | Costo esterno per tonnellata | Valutazione economica per modulo | Valutazione economica per tonnellata di moduli |
|--------|--------------------|-----------------|---------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------------|--|
| Cadmio | 383 mg/kg | 12 kg | 4596 mg | 46 € | 46 000 € | 0,14 € | 12,04 € |
| Piombo | 576 mg/kg | 22 kg | 12672 mg | 1 174 € | 1 174 000 € | 7 662 € | 348 255 € |

Figura 5.8: Valutazione economica dei rischi ambientali

Possiamo notare in tabella come la quantificazione economica per i rischi alla salute umana dovuti al piombo sia enormemente più alta di quella del cadmio. L'agenzia Internazionale per la ricerca sul cancro (IARC) considera infatti il piombo un elemento che ha molta più probabilità di entrare in contatto con il corpo umano, causando molti più danni. I suoi effetti nocivi inoltre sono più difficili da controllare e da prevedere e per questo valutati economicamente di più.

5.3.2 Perdita di materie prime

La composizione materiale media dei moduli fotovoltaici è già stata illustrata nel capitolo 2.

Vetro e alluminio sono i principali componenti di tutte le tipologie di moduli fotovoltaici, con percentuali in peso dell' 80% e del 10% rispettivamente.

Al loro interno però i pannelli contengono anche molte altre sostanze, tra cui piccole quantità di metalli rari.

Essi sono presenti in percentuali molto basse, normalmente 1% circa, ma dato il loro costo elevato è utile tenerne conto per un'analisi economica completa.

I metalli rari più utilizzati nei moduli fotovoltaici sono l'argento, l'indio, il gallio e il germanio.

A questo scopo è utile richiamare la figura 2.8 per poter capire meglio l'analisi seguente:

| Materiale | Moduli al silicio cristallino | Moduli a film sottile | | |
|--|-------------------------------|---------------------------|-------|-------------------------|
| | | a-Si | CdTe | CIS / CIGS |
| Vetro | 74 % | 86 % | 95 % | 84 % |
| Alluminio | 10 % | < 1 % | < 1 % | 12 % |
| Altri componenti (inclusi i metalli rari) | 16 % | 14 % | 4 % | 4 % |
| Altri componenti (contenuto maggiore dell' 1%) | EVA, Tedlar, silicio, adesivo | Poliolo, MDI | EVA | EVA |
| Metalli rari contenuti | Argento (Ag) | Indio (In), Germanio (Ge) | | Indio (In), Gallio (Ga) |
| Presenza di Cadmio (Cd) o Piombo (Pb) | Pb | | Cd | Cd |

Figura 5.9: Composizione percentuale dei vari tipi di moduli fotovoltaici

Valutazione economica

Per l'analisi si sono prese in esame le due tecnologie di pannelli fv più utilizzate e diffuse: i moduli al silicio cristallino e al silicio amorfo.

Per poter valutare la perdita economica si sono considerati per i materiali coinvolti i prezzi di mercato attuale e i tipi di modulo in cui essi sono contenuti.

Il tutto è visibile in fig 5.10:

| Materiale | Prezzo [€/Kg] | Tipi di modulo in cui è contenuto |
|---------------|---------------|-----------------------------------|
| Alluminio | 1,20 | tutte le tecnologie |
| Vetro | 0,05 | tutte le tecnologie |
| Argento (Ag) | 650 | c-Si |
| Indio (In) | 442 | a-Si, CIS, CIGS |
| Gallio (Ga) | 515 | CIGS |
| Germanio (Ge) | 957 | a-Si |

Figura 5.10: Costo dei materiali presenti

Lo smaltimento non corretto dei moduli fotovoltaici può portare dunque allo spreco dei materiali contenuti in essi e quindi ad una perdita economica non indifferente.

La figura 5.11 mostra le perdite economiche dovute al non recupero dei materiali presenti nei moduli.

| | | | Silicio Cristallino (c-Si) | | Silicio Amorfo (a-Si) | |
|--------------------|---------------|-------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| Materiale | Prezzo [€/Kg] | Percentuale di recupero | Peso pannello [kg/Wp] | Prezzo [€/Wp] | Peso pannello [kg/Wp] | Prezzo [€/Wp] |
| Vetro | 0,05 € | 95% | 0,0734 | 0,0037 € | 0,2371 | 0,0119 € |
| Alluminio | 1,20 € | 100% | 0,0107 | 0,0128 € | 0,0001 | 0,0001 € |
| Metalli rari | variabile | 30% | 0,0003 | 0,1989 € | 0,0009 | 0,6086 € |
| Totale | | | | 0,22 € | | 0,62 € |
| Per modulo (media) | | | | 46,31 € | | 37,23 € |
| Per Kg | | | | 2.105 € | | 2.349 € |

Figura 5.11: Perdite economiche dovute al non riutilizzo delle materie prime

Si osserva come la perdita economica maggiore sia dovuta proprio ai metalli rari: nonostante la modesta quantità presente nei moduli infatti hanno un peso economico elevato visti i loro prezzi di mercato molto alti.

5.4 Impatti economici

Come tutti i processi produttivi anche per quello di riciclaggio di moduli fotovoltaici è necessario considerare i suoi costi di realizzazione e di implementazione.

I costi sostenuti e considerati in questo capitolo si riferiscono ai costi di raccolta, di trasporto, di trattamento e di riciclaggio, valutati per entrambi gli scenari e le politiche di sostegno precedentemente esposti.

I costi sostenuti si possono dividere in due grandi categorie:

- **costi logistici**
- **costi di trattamento e riciclaggio**

I **costi logistici** sono stati considerati costanti per tutti i casi previsti (per lo scenario A invece sono pari a 0) e per tutte le tecnologie di moduli.

Essi dipendono dal metodo di raccolta dei moduli e dalla distanza tra le installazioni fotovoltaiche e i centri di raccolta.

Sono stati stimati in 150€a tonnellata grazie ai dati forniti da Pv Cycle nel suo primo anno di attività.

I **costi di trattamento e riciclaggio** si differenziano invece da caso a caso.

Nello scenario A i costi sono stati assunti pari a zero poichè il riciclaggio non viene intrapreso.

Nello scenario B il riciclaggio viene attuato in impianti per il trattamento generico del vetro: alla fine del processo solo questo materiale viene quindi recuperato ed è possibile rivenderlo.

Per le politiche A e B invece sono state fatte considerazioni differenti. I processi di riciclaggio attivi saranno di alta qualità, con costi sostenuti elevati ma bilanciati da un'efficienza nel recupero dei materiali molto alta.

Si configurano così due tipologie di processo:

- **processo di bassa qualità:**

è quello considerato per lo scenario B nel quale i moduli vengano triturati e i materiali vengano separati successivamente.

L'unico materiale recuperabile però è il vetro, mentre gli altri composti presenti non vengono riutilizzati;

- **processo di alta qualità:**

prima del trattamento termico avviene la separazione dal modulo della scatola di giunzione e della cornice in alluminio.

Si possono recuperare inoltre tutti i materiali coinvolti, con conseguente aumento dell'efficienza.

La differenza tra questi due processi è visibile graficamente in figura 5.12:

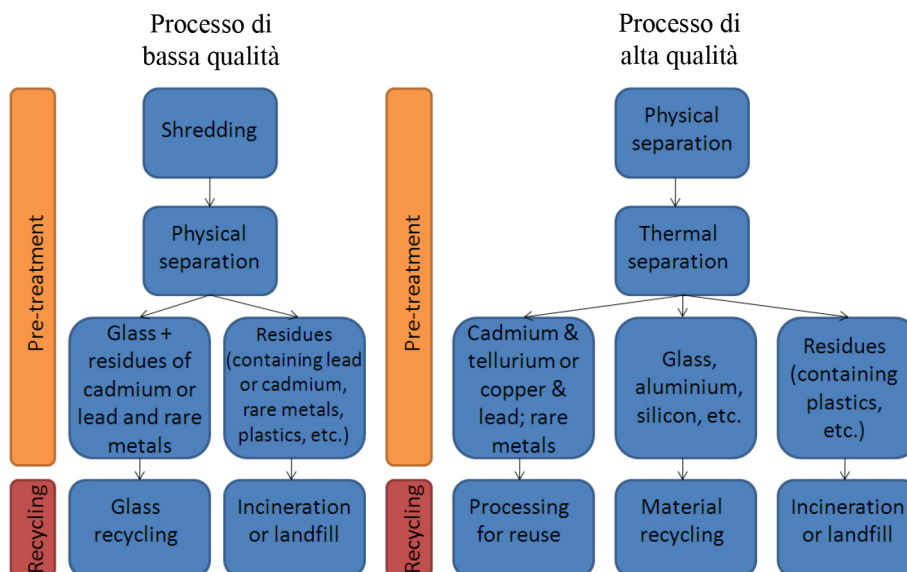


Figura 5.12: Due differenti processi di riciclaggio

Valutazione economica

Appare chiaro dunque come i due differenti processi considerati comportino costi e modalità differenti per poterli attuare.

La maggior spesa sostenuta per un processo di alta qualità viene però compensata dal maggior recupero di materiali attuabile.

Le spese sostenute differenziate per i vari casi possibili sono visibili in fig 5.13:

| SCENARIO A “Worst Case” | | | |
|-------------------------|----------------------------|--|----------------------------|
| | Costi logistici [€/ton] | Costi di trattamento e riciclaggio [€/ton] | Costi totali [€/ton] |
| c-Si | 0 | 0 | 0 |
| a-Si | 0 | 0 | 0 |
| CdTe | 0 | 0 | 0 |
| CIS/CIGS | 0 | 0 | 0 |

| SCENARIO B “Voluntary Action” | | | |
|-------------------------------|----------------------------|--|----------------------------|
| | Costi logistici [€/ton] | Costi di trattamento e riciclaggio [€/ton] | Costi totali [€/ton] |
| c-Si | 150,00 | 25,00 | 175,00 |
| a-Si | 150,00 | 25,00 | 175,00 |
| CdTe | 150,00 | 25,00 | 175,00 |
| CIS/CIGS | 150,00 | 25,00 | 175,00 |

| POLITICA A “Residential PV in WEEE” | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|--|----------------------------|
| | Costi logistici [€/ton] | Costi di trattamento e riciclaggio [€/ton] | Costi totali [€/ton] |
| c-Si | 150,00 | 140,00 | 290,00 |
| a-Si | 150,00 | 60,00 | 210,00 |
| CdTe | 150,00 | 119,00 | 269,00 |
| CIS/CIGS | 150,00 | 120,00 | 270,00 |

| POLITICA B “All PV in WEEE” | | | |
|-----------------------------|----------------------------|--|----------------------------|
| | Costi logistici [€/ton] | Costi di trattamento e riciclaggio [€/ton] | Costi totali [€/ton] |
| c-Si | 150,00 | 140,00 | 290,00 |
| a-Si | 150,00 | 60,00 | 210,00 |
| CdTe | 150,00 | 119,00 | 269,00 |
| CIS/CIGS | 150,00 | 120,00 | 270,00 |

Figura 5.13: Costi totali del riciclaggio nei vari casi previsti

Questi dati si riferiscono a costi odierni. In futuro le enormi quantità di moduli da trattare porterà allo sfruttamento delle economie di scala con un conseguente abbattimento delle spese.

Nell’analisi presente comunque sono stati considerati i dati attuali, non valutando future fluttuazioni del prezzo.

5.5 Impatti sociali

I possibili benefici sociali valutati in questa analisi si riferiscono alla creazione di posti di lavoro dati dallo sviluppo di nuovi metodi e impianti per il riciclaggio dei moduli fotovoltaici.

Il numero di posti creati è stato valutato con riferimento alla Politica B, l'opzione più remunerativa da questo punto di vista.

Per le altre opzioni i posti di lavoro creati si sono calcolati riducendo la percentuale di moduli fotovoltaici trattati.

La situazione possibile che si andrà a delineare è visibile in figura 5.14 di seguito riportata:

| | Scenario A “Worst Case” | Scenario B “Voluntary Action” | Politica A “Residential PV in WEE” | Politica B “All PV in WEEE” |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|---|-----------------------------------|
| Tasso di riciclaggio | 0 % | 24 % | 76 % | 85 % |
| Numero di posti di lavoro creati | | | | |
| 2030 | 0 | 100 | 3250 | 5000 |
| 2040 | 0 | 240 | 7800 | 12000 |
| 2050 | 0 | 400 | 13000 | 20000 |

Figura 5.14: Numero di posti di lavoro creati

Capitolo 6

ANALISI ECONOMICA COMPLETA

Tutte le considerazioni e le ipotesi fatte nel capitolo 5 verranno utilizzate per tracciare le tabelle seguenti, in cui si andranno ad analizzare costi e benefici del processo di riciclaggio.

Esse rappresentano l'analisi economica finale e mettono a confronto i benefici e i costi nei diversi casi possibili precedentemente analizzati.

Le figure 6.1, 6.2, 6.3 nelle pagine seguenti riuniscono tutte le ipotesi fatte finora e tracciano un'analisi completa dei costi, con riferimento all'anno 2030, 2040 e 2050 rispettivamente.

| 2030 (cifre annuali) | Scenario A: "Worst Case" | Scenario B : "Voluntary Action" | Politica A: "Residential Pv in WEEE" | Politica B: "All Pv in WEE" |
|---|-----------------------------|------------------------------------|--|--------------------------------|
| Quantità (in milioni di tonnellate) | | | | |
| Quantità di rifiuti PV generati | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 |
| Quantità di moduli PV raccolti, trattati e mandati al riciclaggio | 0,00 | 0,04 | 0,17 | 0,19 |
| Quantità di moduli PV trattata in modo non corretto | 0,22 | 0,18 | 0,05 | 0,03 |
| Benefici Ambientali | | | | |
| Inquinamento del suolo e dell'aria (in tonnellate) | | | | |
| Rilascio di Piombo (dai moduli al c-Si) | 15/102 | 12/82 | 4/25 | 2/15 |
| Rilascio di Cadmio (dai moduli al CdTe) | 0,22/1 | 0,18/1 | 0,053/0,21 | 0,03/0,19 |
| Inquinamento del suolo e dell'aria (costo esterno medio, in miliardi di €) | | | | |
| Rilascio di Piombo (dai moduli al c-Si) | -0,07 | -0,05 | -0,02 | -0,01 |
| Rilascio di Cadmio (dai moduli al CdTe) | -0,000034 | -0,000027 | -0,000008 | -0,000005 |
| Totali dei costi esterni | -0,07 | -0,05 | -0,02 | -0,01 |
| Risparmio di risorse (input di riciclaggio, in milioni di tonnellate) | | | | |
| Vetro (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,03 | 0,13 | 0,15 |
| Alluminio (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,0041 | 0,016 | 0,018 |
| Metalli Rari (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,0004 | 0,0017 | 0,0019 |
| Risparmio di risorse (output di riciclaggio, in milioni di tonnellate) | | | | |
| Vetro (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,03 | 0,12 | 0,14 |
| Alluminio (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,00 | 0,016 | 0,018 |
| Metalli Rari (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,00 | 0,0005 | 0,006 |
| Risparmio di risorse (output di riciclaggio, in miliardi di €) | | | | |
| Vetro (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,0005 | 0,006 | 0,007 |
| Alluminio (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,00 | 0,019 | 0,021 |
| Metalli Rari (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,00 | 0,34 | 0,38 |
| Risparmio totale di risorse | 0,00 | 0,0005 | 0,36 | 0,40 |
| Costi sostenuti | | | | |
| Costi (in miliardi di €) | | | | |
| Costi logistici | 0,00 | -0,008 | -0,05 | -0,05 |
| Costi di trattamento e di riciclaggio | 0,00 | -0,001 | -0,02 | -0,03 |
| Costi totali | 0,00 | -0,01 | -0,07 | -0,08 |
| Impatti sociali | | | | |
| Creazione di lavoro (numero di posti di lavoro creati) | | | | |
| Lavoro creato | 0 | 100 | 3.250 | 5.000 |
| Benefici netti (in miliardi di €) | | | | |
| Benefici netti | -0,07 | -0,06 | 0,27 | 0,31 |
| Benefici netti (nei confronti dello Scenario A) | N/A | 0,01 | 0,342 | 0,384 |
| Benefici netti (nei confronti dello Scenario B) | N/A | N/A | 0,337 | 0,378 |

Figura 6.1: Valutazione finale dei vantaggi economici previsti per il 2030

| 2040 (cifre annuali) | Scenario A: “Worst Case” | Scenario B : “Voluntary Action” | Politica A: “Residential Pv in WEEE” | Politica B: “All Pv in WEE” |
|---|-----------------------------|------------------------------------|--|--------------------------------|
| Quantità (in milioni di tonnellate) | | | | |
| Quantità di rifiuti PV generati | 3,18 | 3,18 | 3,18 | 3,18 |
| Quantità di moduli PV raccolti, trattati e mandati al riciclaggio | 0,00 | 0,78 | 2,43 | 2,70 |
| Quantità di moduli PV trattata in modo non corretto | 3,18 | 2,39 | 0,74 | 0,48 |
| Benefici Ambientali | | | | |
| Inquinamento del suolo e dell'aria (in tonnellate) | | | | |
| Rilascio di Piombo (dai moduli al c-Si) | 150/1037 | 113/778 | 35/243 | 23/156 |
| Rilascio di Cadmio (dai moduli al CdTe) | 21/121 | 16/91 | 5/28 | 3/18 |
| Inquinamento del suolo e dell'aria (costo esterno medio, in miliardi di €) | | | | |
| Rilascio di Piombo (dai moduli al c-Si) | -0,70 | -0,52 | -0,16 | -0,10 |
| Rilascio di Cadmio (dai moduli al CdTe) | -0,003 | -0,002 | -0,001 | -0,0005 |
| Totali dei costi esterni | -0,70 | -0,53 | -0,16 | -0,11 |
| Risparmio di risorse (input di riciclaggio, in milioni di tonnellate) | | | | |
| Vetro (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,64 | 2,01 | 2,23 |
| Alluminio (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,05 | 0,161 | 0,178 |
| Metalli Rari (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,01 | 0,025 | 0,028 |
| Risparmio di risorse (output di riciclaggio, in milioni di tonnellate) | | | | |
| Vetro (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,61 | 1,91 | 2,12 |
| Alluminio (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 0,18 |
| Metalli Rari (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,00 | 0,0075 | 0,0084 |
| Risparmio di risorse (output di riciclaggio, in miliardi di €) | | | | |
| Vetro (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,01 | 0,10 | 0,11 |
| Alluminio (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,00 | 0,19 | 0,21 |
| Metalli Rari (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,00 | 5,05 | 5,60 |
| Risparmio totale di risorse | 0,00 | 0,01 | 5,33 | 5,92 |
| Costi sostenuti | | | | |
| Costi (in miliardi di €) | | | | |
| Costi logistici | 0,00 | -0,14 | -0,67 | -0,75 |
| Costi di trattamento e di riciclaggio | 0,00 | -0,02 | -0,31 | -0,34 |
| Costi totali | 0,00 | -0,16 | -0,98 | -1,09 |
| Impatti sociali | | | | |
| Creazione di lavoro (numero di posti di lavoro creati) | | | | |
| Lavoro creato | 0 | 240 | 7.800 | 12.000 |
| Benefici netti (in miliardi di €) | | | | |
| Benefici netti | -0,70 | -0,67 | 4,19 | 4,73 |
| Benefici netti (nei confronti dello Scenario A) | N/A | 0,03 | 4,89 | 5,43 |
| Benefici netti (nei confronti dello Scenario B) | N/A | N/A | 4,87 | 5,41 |

Figura 6.2: Valutazione finale dei vantaggi economici previsti per il 2040

| 2050 (cifre annuali) | Scenario A: "Worst Case" | Scenario B : "Voluntary Action" | Politica A: "Residential Pv in WEEE" | Politica B: "All Pv in WEE" |
|---|-----------------------------|------------------------------------|--|--------------------------------|
| Quantità (in milioni di tonnellate) | | | | |
| Quantità di rifiuti PV generati | 9,16 | 9,16 | 9,16 | 9,16 |
| Quantità di moduli PV raccolti, trattati e mandati al riciclaggio | 0,00 | 2,18 | 7,00 | 7,79 |
| Quantità di moduli PV trattata in modo non corretto | 9,16 | 6,98 | 2,16 | 1,37 |
| Benefici Ambientali | | | | |
| Inquinamento del suolo e dell'aria (in tonnellate) | | | | |
| Rilascio di Piombo (dai moduli al c-Si) | 316/2181 | 221/1527 | 72/495 | 47/327 |
| Rilascio di Cadmio (dai moduli al CdTe) | 40/228 | 28/159 | 9/52 | 6/34 |
| Inquinamento del suolo e dell'aria (costo esterno medio, in miliardi di €) | | | | |
| Rilascio di Piombo (dai moduli al c-Si) | -1,47 | -1,03 | -0,33 | -0,22 |
| Rilascio di Cadmio (dai moduli al CdTe) | -0,01 | -0,004 | -0,001 | -0,001 |
| Totali dei costi esterni | -1,47 | -1,03 | -0,33 | -0,22 |
| Risparmio di risorse (input di riciclaggio, in milioni di tonnellate) | | | | |
| Vetro (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 1,82 | 6,00 | 6,68 |
| Alluminio (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,13 | 0,34 | 0,38 |
| Metalli Rari (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,02 | 0,07 | 0,08 |
| Risparmio di risorse (output di riciclaggio, in milioni di tonnellate) | | | | |
| Vetro (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 1,73 | 5,70 | 6,35 |
| Alluminio (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,00 | 0,34 | 0,38 |
| Metalli Rari (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,00 | 0,022 | 0,025 |
| Risparmio di risorse (output di riciclaggio, in miliardi di €) | | | | |
| Vetro (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,03 | 0,29 | 0,32 |
| Alluminio (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,00 | 0,41 | 0,45 |
| Metalli Rari (nei moduli c-Si e a film sottile) | 0,00 | 0,00 | 14,96 | 16,65 |
| Risparmio totale di risorse | 0,00 | 0,03 | 15,66 | 17,42 |
| Costi sostenuti | | | | |
| Costi (in miliardi di €) | | | | |
| Costi logistici | 0,00 | -0,33 | -1,05 | -1,17 |
| Costi di trattamento e di riciclaggio | 0,00 | -0,05 | -0,83 | -0,92 |
| Costi totali | 0,00 | -0,38 | -1,88 | -2,09 |
| Impatti sociali | | | | |
| Creazione di lavoro (numero di posti di lavoro creati) | | | | |
| Lavoro creato | 0 | 400 | 13.000 | 20.000 |
| Benefici netti (in miliardi di €) | | | | |
| Benefici netti | -1,47 | -1,39 | 13,44 | 15,11 |
| Benefici netti (nei confronti dello Scenario A) | N/A | 0,09 | 14,91 | 16,58 |
| Benefici netti (nei confronti dello Scenario B) | N/A | N/A | 14,83 | 16,49 |

Figura 6.3: Valutazione finale dei vantaggi economici previsti per il 2050

6.1 Considerazioni e valutazioni con riferimento all'anno 2050

6.1.1 Scenario A: "Worst Case"

Quantità di moduli fotovoltaici

In questo scenario, data l'assenza di una regolamentazione per i rifiuti fotovoltaici, si presume che tutte le 9,16 milioni di tonnellate vengano smaltite in maniera non corretta, assumendo quindi una percentuale di riciclaggio dello 0%.

Impatti Ambientali

L'impatto ambientale dovuto all'immissione nell'ambiente di sostanze pericolose è associabile ad una quantità di piombo tra le 320 e 2200 tonnellate e quantità di cadmio comprese tra le 40 e le 230 tonnellate.

L'impatto economico causato è una spesa di circa 1,5 miliardi di €.

Il risparmio di risorse e materie prime sarà nullo poichè tutti i moduli non verranno nè trattati nè tantomeno riciclati.

Impatti economici

I costi logistici e di riciclaggio sono ovviamente pari a 0 poichè nessuna di queste due azioni viene intrapresa.

Impatti sociali

Non ci sarà alcuna creazione di posti di lavoro legati all'industria del riciclaggio fotovoltaico.

6.1.2 Scenario B: "Voluntary Action"

Quantità di moduli fotovoltaici

In questo scenario si presume che il livello di riciclaggio raggiunto nel 2011 viene mantenuto uguale nel corso degli anni.

Delle circa 9 milioni di tonnellate di rifiuti quindi più di 2 milioni verranno riciclate, mentre le altre 7 verranno smaltite in maniera non idonea.

Il tasso di riciclaggio viene assunto pari al 24%

Impatti Ambientali

Gli impatti ambientali previsti saranno ovviamente minori rispetto allo scenario A. L'immissione nell'ambiente di piombo è stimata in una quantità compresa tra le 220 e le 1500 tonnellate per il piombo e tra le 30 e le 160 tonnellate di cadmio, con una spesa prevista di circa 1 miliardo di €.

Delle risorse che entrano in input nel processo di riciclaggio si presume che si riuscirà a recuperare soltanto il vetro con una percentuale del 95%, ottenendo così un risparmio di 30 milioni di €.

Impatti economici

Il processo di riciclaggio è considerato che avvenga in centri specializzati per il riciclo del vetro piano, con una spesa complessiva per il trattamento pari a 175 €/ton.

I costi totali quindi ammontano a 380 milioni €.

Impatti sociali

La creazione di posti di lavoro è associabile alla maggior manodopera necessaria per trattare le quantità crescenti di materiale trattato.

L'occupazione prevista è stimata in 400 posti di lavoro creati per il 2050.

6.1.3 Politica A: "Residential PV in WEEE"

Quantità di moduli fotovoltaici

In questa politica considerata si considera che i soli moduli ad uso residenziale, rappresentanti l'86% del mercato, verranno regolamentati dalla direttiva WEEE. Delle circa 9 milioni di tonnellate di rifiuti quindi più di 7 milioni verranno riciclate, ottenendo così un tasso di riciclaggio pari al 76%

Impatti Ambientali

Gli impatti ambientali previsti risulteranno molto minori rispetto sia allo scenario A che allo scenario B.

L'immissione nell'ambiente di piombo è stimata in una quantità compresa tra le 70 e le 500 tonnellate per il piombo e tra le 10 e le 50 tonnellate di cadmio, con una spesa prevista di circa 330 milioni di €.

Si riusciranno a recuperare tutte le materie prime che entrano nel processo (ovvero vetro, alluminio e metalli rari), ottenendo così un risparmio di 15,6 miliardi di €.

Impatti economici

La spesa complessiva prevista dovuta alla raccolta, al trattamento e al riciclaggio dei moduli è stimata in circa 2 miliardi di €.

L'alto tasso di recupero dei materiali previsto (100% per l'alluminio, 95% per il vetro e 30% per i metalli rari) farà sì che i risparmi ottenuti saranno molto elevati.

I benefici economici potranno crescere ancora di più se miglioreranno le tecnologie di recupero, specialmente per i metalli rari.

Impatti sociali

Dato il tasso di riciclaggio elevato e la quantità di moduli in gioco si prospetta un aumento dell'occupazione nel settore del riciclaggio fotovoltaico pari a 13000 posti di lavoro.

6.1.4 Politica B: "All PV in WEEE"

Quantità di moduli fotovoltaici

Se tutti i moduli saranno soggetti alle direttive WEEE, come previsto in questa politica, delle 9 milioni di tonnellate di rifiuti più di 8 saranno adeguatamente trattate. Il tasso di riciclaggio salirà così all'85%.

Impatti Ambientali

Gli impatti ambientali previsti risulteranno ancora minori rispetto alla politica A. L'immissione nell'ambiente di piombo è stimata in una quantità compresa tra le 50 e le 330 tonnellate per il piombo e tra le 5 e le 35 tonnellate di cadmio, con una spesa prevista di circa 220 milioni di €.

Si riusciranno a recuperare tutte le materie prime che entrano nel processo (ovvero vetro, alluminio e metalli rari), ottenendo così un risparmio di 17,42 miliardi di €.

Impatti economici

La spesa complessiva prevista dovuta alla raccolta, al trattamento e al riciclaggio dei moduli è stimata in poco più di 2 miliardi di €.

L'alto tasso di recupero dei materiali previsto (100% per l'alluminio, 95% per il vetro e 30% per i metalli rari) farà sì che i risparmi ottenuti saranno molto elevati.

I benefici economici potranno crescere ancora di più se miglioreranno le tecnologie di recupero, specialmente per i metalli rari.

Impatti sociali

Dato il tasso di riciclaggio elevato e la quantità di moduli in gioco si prospetta un aumento dell'occupazione nel settore del riciclaggio fotovoltaico pari a 20000 posti di lavoro.

Capitolo 7

CONCLUSIONI

Lo smaltimento dei pannelli fotovoltaici sarà un problema che si dovrà affrontare per non ritrovarsi nella contraddizione di produrre inquinamento attraverso la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, come quella fotovoltaica, il cui obiettivo invece è proprio quello di salvaguardare l'ambiente.

La soluzione di questo problema non potrà che essere il riciclaggio, in modo tale da recuperare le materie prime che altrimenti finirebbero in discarica.

Lo scopo di questa tesi era quello di dare una panoramica sulla situazione attuale e di ipotizzare diverse situazioni future.

Il riciclaggio al momento attuale non risulta essere vantaggioso, dati le modeste quantità di rifiuti da trattare, ma si è dimostrato come in futuro lo potrà essere.

Includere i moduli fotovoltaici nella direttiva WEEE riduce fortemente gli impatti ambientali negativi e genera dei benefici economici: limitare la quantità di pannelli gestita nella maniera sbagliata contribuisce infatti a salvaguardare l'ambiente, riducendo le quantità di cadmio e piombo immesse nel suolo e in aria, oltre che contrastare la perdita di materie prime.

Oggi la maggior parte della produzione si è spostata nei paesi dove c'è abbondanza di materie prime e l'ambiente non è salvaguardato in futuro tali paesi non riusciranno a reggere interamente da soli l'aumento di produzione richiesto: il lavoro quindi si tornerà a produrre anche in quei paesi che oggi sono stati "abbandonati".

Appare chiaro dunque come per queste zone l'importanza del riciclaggio dei moduli dismessi può essere notevole: anticipare i tempi e attrezzarsi già da oggi per il domani potrebbe risultare una mossa vincente e contribuire a rilanciare, almeno in parte, l'economia dei paesi occidentali.

Bibliografia

- [1] European Commission DG ENV (2011) **Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE directive**, Final Report.
- [2] Fiorese,Marco (2009), **Il Sole è Rotondo**, Hyper, Venezia.
- [3] Moroni,Mauro Onofri,Fabrizio (2009), **Piano casa, detrazioni fiscali e fotovoltaico**, EPC S.r.l, Roma.
- [4] Groppi,Francesco Zuccaro,Carlo (2000), **Impianti solari fotovoltaici**, Editoriale Delfino, Milano.
- [5] **www.infobuildenergia.it**
- [6] **www.zeroemission.eu**
- [7] **www.solarserver.com**