

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia
Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Gestionale

Gestione del recupero e del riciclo di materiali derivanti dal fine vita di pannelli
fotovoltaici – Il caso S.A.B.A.R. S.p.A.

Laureanda: Giulia Ferretti

Relatore: Prof.ssa Monia Montorsi

Correlatore: Ing. Marco Boselli

Anno Accademico 2010/2011

SOMMARIO

SOMMARIO **2**

1. INTRODUZIONE **6**

2. PANNELLI FOTOVOLTAICI **9**

2.1. VANTAGGI E SVANTAGGI **9**

2.2. FUNZIONAMENTO DELLE CELLE FOTOVOLTAICHE **11**

2.2.1. IL SILICIO E L'EFFETTO FOTOVOLTAICO 11

2.3. PRINCIPALI COMPONENTI DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO **16**

2.3.1. MODULI 17

2.3.2. STRUTTURE DI SOSTEGNO 17

2.3.3. BATTERIE 18

2.3.4. INVERTER 18

2.4. FUNZIONAMENTO IMPIANTO FOTOVOLTAICO **19**

2.5. TIPOLOGIE DI PANNELLI FOTOVOLTAICI **20**

2.5.1. MODULI MONOCRISTALLINI 20

2.5.2. MODULI POLICRISTALLINI 21

2.5.3. MODULI IN SILICIO AMORFO 21

2.5.4. MODULI IN FILM SOTTILE 22

2.5.5. IL FOTOVOLTAICO ORGANICO 23

3. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA DEI RIFIUTI FOTOVOLTAICI **25**

3.1. L'AZIENDA S.A.BA.R. S.P.A. **25**

3.1.1. GIAPPONE 27

3.1.2. STATI UNITI 27

3.1.3. INDIA 27

3.1.4. BANGLADESH 28

3.1.5. AUSTRALIA 28

3.1.6. EUROPA 29

3.1.7. ITALIA 30

3.2. SINTESI DELLA NORMATIVA **32**

3.2.1. IL PROTOCOLLO DI KYOTO	32
3.2.2. LEGISLAZIONE COMUNITARIA. DIRETTIVA 2001/77/CE	33
3.2.3. LEGISLAZIONE NAZIONALE. D.LGS 387 DEL 2003	33
3.2.4. CONTO ENERGIA	33
4. ACCUMULO DEI MODULI A FINE VITA	35
5. PROCESSO DI ANALISI DEI MATERIALI COSTITUENTI I MODULI FOTVOLTAICI	41
5.1. PANNELLI FOTVOLTAICI UTILIZZATI	41
5.1.1. MODULO MONOCRISTALLINO: TDB 125X125-72-P 180W	42
5.1.2. MODULO POLICRISTALLINO: ZN SHINE SOLAR ZN280	43
5.1.3. MODULO IN SILICIO AMORFO: SHARP NA-F121G5	43
5.2. METODOLOGIA SPERIMENTALE DI ANALISI DEI MATERIALI COSTITUENTI	44
5.2.1. DISASSEMBLAGGIO TELAIO IN ALLUMINIO	45
5.2.2. TAGLIO DELLE CELLE FOTVOLTAICHE E SEPARAZIONE DEI MATERIALI COMPONENTI I WAFER	46
5.2.3. ANALISI TERMICA DIFFERENZIALE (DTA)	48
5.2.4. DETERMINAZIONE DENSITÀ DEI VETRI CON PICNOMETRO A ELIO	49
5.2.5. ANALISI CON IL MICROSCOPIO ELETTRONICO A SCANSIONE (SEM)	50
6. RISULTATI DELLE ANALISI MICROSTRUTTURALI	54
6.1. ANALISI TERMICA DIFFERENZIALE (DTA)	54
6.2. DENSITÀ DEI VETRI OTTENUTA CON IL PICNOMETRO A ELIO	57
6.3. ANALISI AL SEM & EDS	58
6.3.1. PANNELLO POLICRISTALLINO	58
6.3.2. PANNELLO MONOCRISTALLINO	64
6.3.3. PANNELLO IN SILICIO AMORFO	69
6.3.4. OSSERVAZIONI SUI RISULTATI DELLE ANALISI	71
7. MATERIALE COMPONENTE	73
7.1 MATERIALI COMPONENTI DEI MODULI CRISTALLINI	73

7.2 MATERIALI COMPONENTI DEI MODULI IN SILICIO AMORFO	74
7.4 QUANTITÀ DI MATERIALE PRESENTE DEI PANNELLI FOTOVOLTAICI INSTALLATI	76
7.4. VALORIZZAZIONE DEI MATERIALI	80
<u>8. DESTINAZIONE DEI RIFIUTI FOTOVOLTAICI</u>	<u>83</u>
8.1. POSSIBILI ALTERNATIVE DI GESTIONE DEI RIFIUTI FOTOVOLTAICI	83
8.1.1. SMALTIMENTO IN DISCARICA	83
8.1.2. PV CYCLE _ CONSORZIO EUROPEO	84
8.1.3. ECOLIGHT _ CONSORZIO ITALIANO	86
8.2 PROCESSI DI RICICLAGGIO SUL MERCATO	87
8.2.1. DEUTSCHE SOLAR	87
<u>CONCLUSIONI</u>	<u>90</u>
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	<u>91</u>
<u>RINGRAZIAMENTI</u>	<u>92</u>

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni l'importanza delle fonti rinnovabili è aumentata considerevolmente in tutto il mondo. Solo in Europa, è stata raggiunto in seno al Consiglio europeo l'accordo sul pacchetto clima ed energia che prevede, entro il 2020, una riduzione del 20% delle emissioni di gas serra, l'aumento dell'efficienza energetica del 20% e il raggiungimento della quota del 20 % di fonti di energia rinnovabile.

Tra le fonti di energia rinnovabile adottabili per il raggiungimento di tale obiettivo ha visto il suo crescente impiego l'energia solare. L'energia solare viene trasformata in energia elettrica grazie ai pannelli fotovoltaici che sfruttano l'effetto fotovoltaico.

Le tecnologie attualmente conosciute per la realizzazione dei pannelli fotovoltaici sono molteplici e la ricerca in questo campo è in continua evoluzione, ma ad oggi i dispositivi maggiormente installati sono quelli in silicio, in particolare in silicio monocristallino, policristallino e amorfo.

Il silicio è un materiale semiconduttore le cui caratteristiche, grazie ad opportuni drogaggi, risultano essere estremamente adatte per la conversione di energia solare in energia elettrica.

Come anticipato, le installazioni fotovoltaiche negli ultimi anni hanno visto la loro massima diffusione, infatti la potenza fotovoltaica installata attualmente nel mondo ammonta a 40 GW. L'Italia detiene il primato di nazione europea con la maggior potenza fotovoltaica installata, che al termine del 2011 ammontava a 12,5 GW ed è destinata a crescere ulteriormente nel corso del 2012.

Lo sviluppo ingente delle installazioni fotovoltaiche oltre a recare indubbi vantaggi sulla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili e pulite, porta con se un significativo problema con il quale avremo a che fare nei prossimi anni: la gestione dei rifiuti fotovoltaici. Infatti, si stima che i moduli fotovoltaici abbiano una vita utile di circa 25-30 anni, al termine della quale i pannelli presentano un rendimento di conversione ridotto del 25-30% dell'efficienza originale. Quindi nel prossimo futuro sarà necessario confrontarsi con un'ingente quantità di rifiuti fotovoltaici da gestire, viste le elevate quantità di dispositivi installati di recente.

S.A.B.A.R. S.p.A., società a totale capitale pubblico, operante nel settore dei servizi di igiene ambientale nel territorio della bassa reggiana, è consapevole di dover gestire nei prossimi anni i rifiuti fotovoltaici e per questo desidera definire anticipatamente una

procedura efficiente che permetta di recuperare, centralizzare ed eventualmente riciclare tali rifiuti nel rispetto dell'ambiente.

La seguente tesi si è posta come obiettivo quello di definire tale procedura, valutando attentamente i materiali componenti i pannelli fotovoltaici monocristallini, policristallini e in silicio amorfo, che potrebbero essere riutilizzati e rivalutati come materie prime seconde, e definendo le possibili alternative esistenti per il recupero e il riciclaggio dei rifiuti fotovoltaici.

La fase di determinazione dei materiali costituenti i pannelli fotovoltaici è stata effettuata grazie ad una procedura sperimentale eseguita presso il DIMA (Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e dell'Ambiente) dell'Università di Modena e Reggio Emilia. Tale metodologia sperimentale consiste innanzitutto nel separare i materiali costituenti il wafer fotovoltaico, grazie ad un bagno criogeno e all'applicazione successiva di una sollecitazione meccanica. Dopo di che è stata eseguita la preparazione dei campioni di materiali costituenti le celle, e quindi ne è stata eseguita l'analisi al Microscopio Elettronico a Scansione (SEM). Tale analisi al SEM ha permesso di evidenziare la microstruttura dei materiali costituenti i pannelli monocristallini, policristallini e in silicio amorfo messi a disposizione per le prove di laboratorio dalla aziende SA.BA.R. S.p.A. ed ELECTRIC WORLD S.r.l.

I risultati ottenuti dalle analisi mostrano come i materiali che in maggior quantità costituiscono una cella fotovoltaica, possano essere facilmente riciclabili e valorizzabili come materie prime seconde. In particolare si è evidenziata la composizione del vetro, grazie anche all'analisi Termica Differenziale (DTA), tipica di un vetro sodalime, o vetro comune normalmente utilizzato per realizzare finestre e quindi riciclabile negli appositi impianti atti al recupero del vetro. Ulteriore aspetto da considerare nella fase di riciclaggio dei rifiuti fotovoltaici è la possibile presenza di materiali nocivi come il piombo, utilizzato nella lega conduttrice.

Si può affermare che i moduli fotovoltaici sono principalmente costituiti da materiali facilmente riciclabili e valorizzabili come materie prime seconde. Risulta quindi conveniente, sia dal punto di vista ambientale che economico, recuperare i rifiuti fotovoltaici e indirizzarli verso un impianto di riciclaggio invece di smaltirli semplicemente in discarica.

Oggi si hanno due esempi virtuosi di enti che si occupano di gestire la rete di recupero dei moduli fotovoltaici esausti, per poi indirizzarli verso l'impianto di riciclaggio dei

pannelli cristallini proprio della società tedesca Deutsche Solar. Tali enti sono l'associazione europea PV Cycle che opera dal 2007 e il consorzio italiano Ecolight la cui attività relativa ai rifiuti fotovoltaici è iniziata soltanto nell'ottobre 2011.

Lo studio svolto in questa tesi vuole dimostrare la convenienza economica, energetica ed ambientale della produzione di energia elettrica dai pannelli fotovoltaici, vista in un'ottica di possibilità di riciclo e successiva valorizzazione dei materiali costituenti i rifiuti fotovoltaici.

2. PANNELLI FOTOVOLTAICI

Negli ultimi anni l'importanza delle fonti energetiche rinnovabili è aumentata considerevolmente in tutto il mondo. Esse sembrano sempre più destinate a diventare le fonti energetiche del futuro. Tale affermazione è evidenziata dall'ultimo rapporto globale di Ren 21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century), secondo cui circa il 20% della produzione elettrica mondiale è stata generata da quest'ultime.

Sono comunemente considerate energie rinnovabili l'energia idroelettrica, solare, eolica, marina e geotermica, ovvero tutte quelle fonti il cui l'utilizzo attuale non ne pregiudica la disponibilità nel futuro.

Tra tutte le fonti di energia rinnovabile, di recente si è assistito ad un notevole sviluppo delle installazioni fotovoltaiche, tale fenomeno sottolinea come il sole risulti essere un'importante fonte di energia pulita ed inesauribile.

I pannelli fotovoltaici sono dispositivi in grado di convertire l'energia solare in energia elettrica mediante effetto fotovoltaico. Essi basano il proprio funzionamento sul loro elemento costitutivo, ovvero la cella fotovoltaica la cui versione più diffusa è quella in materiale cristallino.



Figura 2.1 : Impianto fotovoltaico

2.1. Vantaggi e Svantaggi

I primi sistemi solari fotovoltaici terrestri per la generazione di energia elettrica risalgono solo ai primi anni '80, pertanto, il fotovoltaico è piuttosto giovane se si considerano i normali tempi di apprendimento e di diffusione di una nuova tecnologia energetica.

Tuttavia, in questo breve periodo il suo sviluppo è stato rapidissimo grazie ai molteplici vantaggi che offre:

- è una fonte rinnovabile percepita come particolarmente pulita e quindi gradita al pubblico;
- in fase di esercizio l'impatto è nullo (non richiede acqua, non dà luogo a emissioni fastidiose o a rumori);

- gli impianti presentano alta affidabilità e ridotti costi di esercizio e manutenzione, per una vita operativa che, è dimostrato, supera i 25 anni;
- la semplicità d'uso, la modularità e la versatilità tecnologica degli impianti li rende adatti a rispondere alle esigenze di utenze sia isolate che connesse alla rete, sia di singole di case che di piccole comunità o distretti industriali, sia dei paesi industrializzati che di quelli in via di sviluppo;
- risulta ideale per realizzare il nuovo modello di generazione distribuita; gli impianti producono energia elettrica vicino all'utenza, modulata sulle sue esigenze, sopperendo ai picchi di domanda e riducendo le perdite legate al trasporto e la necessità di aumentare la capacità delle linee di trasmissione.

D'altronde vi sono oggettivi svantaggi nella produzione di energia elettrica mediante conversione fotovoltaica, che però potrebbero essere superati. Gli svantaggi più significativi sono:

- gli impianti possono rovinare l'aspetto esterno di un'abitazione o di uno stabilimento, in quanto l'aspetto estetico dei pannelli fotovoltaici non è gradevole. Tale svantaggio è un pregiudizio che si può eliminare, grazie a una conoscenza sempre più diffusa dei benefici, la presenza degli impianti si trasformerà in un valore aggiunto al valore dell'immobile in cui verrà installato l'impianto fotovoltaico. Gli ultimi impianti risultano inoltre estremamente piacevoli da vedere e perfettamente integrati nelle strutture di sostegno.
- Rendimento della conversione: le rese dei materiali semiconduttori utilizzati nei moduli fotovoltaici sono notevolmente incrementate negli ultimi anni grazie alle nuove tecnologie impiegate, fornendo e garantendo componenti resistenti e duraturi nel tempo, sia nella loro struttura che nella loro resa, ma comunque l'efficienza della conversione si riduce negli anni.
- Attualmente il costo dell'energia fotovoltaica risulta elevato ed appare non conveniente a causa dei costi iniziali di installazione dell'impianto. A dare risposta a questo punto l'ente Gestore dei Servizi Elettrici GSE ha attivato degli incentivi mirati a favorire la realizzazione di impianti sia per l'utenza civile che per quella industriale. La sfida che è necessario vincere perché il fotovoltaico si affermi come fonte energetica del futuro resta la sostanziale riduzione dei costi.
- Ulteriore problema è l'intermittenza e la non continuità della radiazione solare, difetto comune anche ad altre fonti rinnovabili e superabile migliorando le

tecnologie di stoccaggio, oppure collegando le reti di trasmissione a centrali in grado di intervenire in caso di prolungati periodi di condizioni meteorologiche perturbate o durante le ore notturne.

Il fotovoltaico, dunque, è una tecnologia chiave per il mix energetico mondiale, ma la sua capacità di penetrazione ha ancora dei limiti dovuti all'aleatorietà della fonte solare e, come anticipato, all'alto costo.

2.2. Funzionamento delle celle fotovoltaiche

La parola fotovoltaico deriva da foton=luce e voltaico → legato all'elettricità, quindi la parola significa elettricità prodotta attraverso la luce.

Il principio di funzionamento delle celle fotovoltaiche, che sono l'unità di base di un modulo fotovoltaico, è detto "effetto fotovoltaico". L'effetto fotovoltaico si manifesta nel momento in cui una radiazione elettromagnetica, colpisce un particolare materiale semiconduttore opportunamente trattato, ed innesca un movimento di elettroni generando una corrente elettrica e quindi una differenza di potenziale. Quando la radiazione solare (fotoni di diversa energia) investe una cella fotovoltaica, la parte di radiazione assorbita dal materiale semiconduttore (solitamente silicio) cede energia agli elettroni della cella che sono, così, liberi di lasciare la loro posizione e si rendono disponibili per la conduzione. Le posizioni lasciate libere (lacune) costituiscono una corrente di cariche positive opposta a quella di cariche negative proprie degli elettroni.

Nelle celle fotovoltaiche, quindi, ci sono elettroni liberi che lasceranno alle loro spalle lacune e si muoveranno in modo disordinato. Per dare una direzione (campo elettrico) al moto degli elettroni è necessario drogare il silicio.

In seguito verrà descritto analiticamente l'effetto fotovoltaico e il funzionamento delle celle.

2.2.1. Il Silicio e l'effetto fotovoltaico

In un singolo atomo gli elettroni di ogni orbitale hanno un proprio livello energetico e vengono attratti al nucleo tanto più forte quanto più sono ad esso vicini. In un cristallo gli elettroni formano una serie di bande energetiche: la banda a più elevata energia viene detta banda conduttrice, quella con energia inferiore viene detta banda di valenza, mentre la differenza tra le due bande è detta banda proibita o bandgap

e corrisponde esattamente alla quantità di energia che serve ad un elettrone per liberarsi dall'atomo.

Questo gap energetico è tanto più piccolo quanto più buone sono le doti di conduttore di un materiale. In figura 2.2 vengono mostrate le rappresentazioni delle bande energetiche tipiche di materiali conduttori, semiconduttori o isolanti:

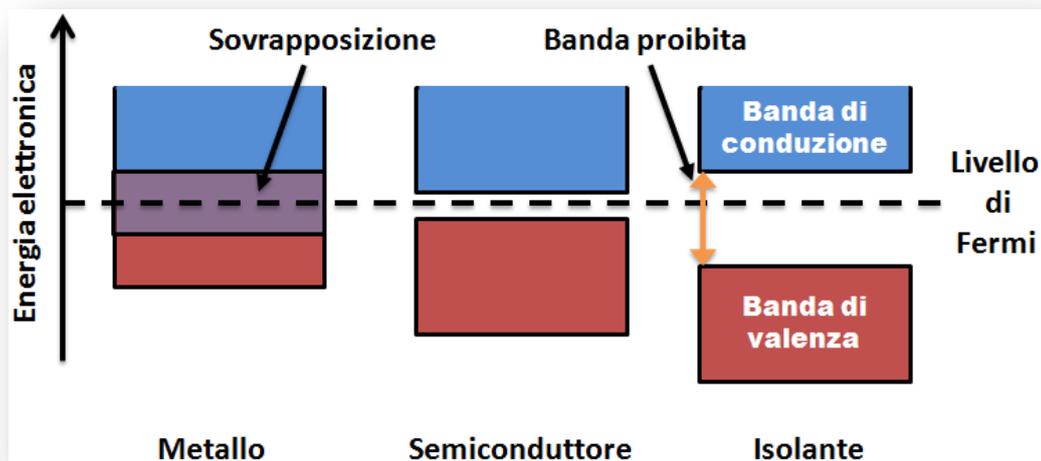


Figura 2.2: Rappresentazione bande energetiche di materiale conduttori, semiconduttori e isolanti

Il silicio è un materiale semiconduttore, pertanto nella sua struttura il gap tra la banda di valenza e quella di conduzione è ridotto, e gli elettroni necessitano di una quantità minima di energia per passare da una banda all'altra. Tale caratteristica rende il silicio adatto alle applicazioni fotovoltaiche.

Inoltre il silicio è il secondo elemento per abbondanza sulla crosta terrestre dopo l'ossigeno, esso si trova nell'argilla, feldspato, granito, quarzo e sabbia. Appartiene al IV periodo nel sistema periodico e il suo atomo è costituito da 14 elettroni di cui solo 4 sono elettroni di valenza esterni, cioè disponibili a legarsi in coppia con elettroni di valenza di altri atomi.

Il cristallo di silicio chimicamente puro è caratterizzato da una struttura a network, in cui ogni atomo è legato in modo covalente con altri quattro atomi in modo tale che all'interno del cristallo non vi siano elettroni liberi.

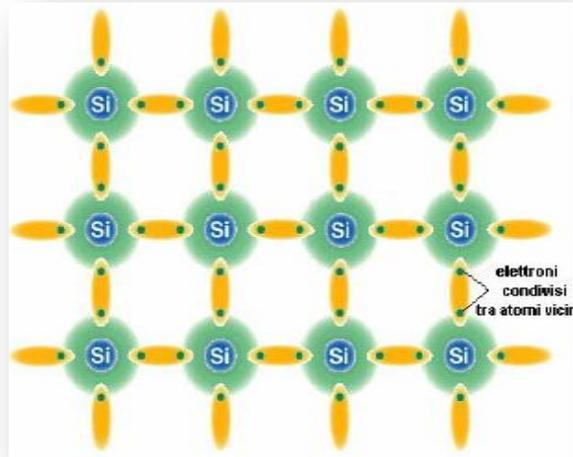


Figura 2.3: Rappresentazione della struttura cristallina del silicio

Affinché il silicio possa essere usato nella produzione di energia elettrica all'interno delle celle fotovoltaiche deve subire un trattamento di drogaggio tale da favorire la creazione di un campo elettrico.

In particolare, il campo elettrico ha origine nel momento in cui due semiconduttori con caratteristiche diverse vengono messi a contatto.

Nel caso specifico del silicio usato nei pannelli fotovoltaici abbiamo due tipi di semiconduttori: quello di tipo n e quello di tipo p. Per il primo semiconduttore viene aggiunta al Si una piccola quantità di elemento del V periodo (P o As), mentre per il semiconduttore elettrico di tipo p viene aggiunta al Si una piccola quantità di elemento del III gruppo (B o G).

Nella struttura cristallina il P va ad occupare lo stesso posto precedentemente occupato dall'atomo di Si, quindi il 5° elettrone di valenza rimane libero e reso disponibile della fascia di conduzione.

Lo schema seguente ci fornisce una rappresentazione del semiconduttore n:

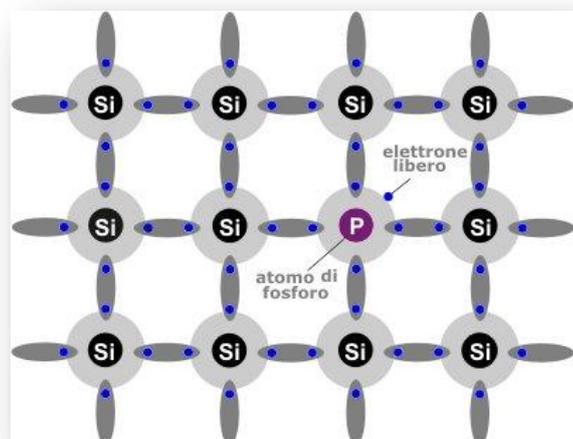


Figura 2.4: Rappresentazione struttura cristallina semiconduttore n

L'atomo del B, invece, va ad occupare nella struttura cristallina lo stesso posto precedentemente occupato da un atomo di Si, in modo che il 4° elettrone di valenza venga a mancare e si crei una lacuna o vacanza, come mostrato nello schema seguente:

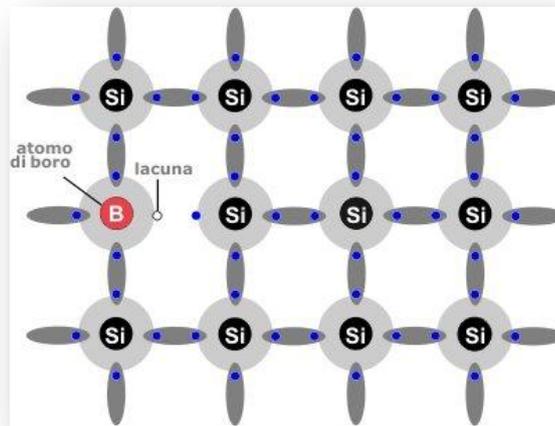


Figura 2.5: Rappresentazione cristallina semiconduttore p

I semiconduttori p ed n, se isolati, sono elettricamente neutri, invece se uniti costituiscono la giunzione p-n (diodo). La seguente figura mostra una rappresentazione della giunzione p-n, in cui si nota un eccesso di cariche negative nello strato n e un eccesso di cariche positive nello strato p:

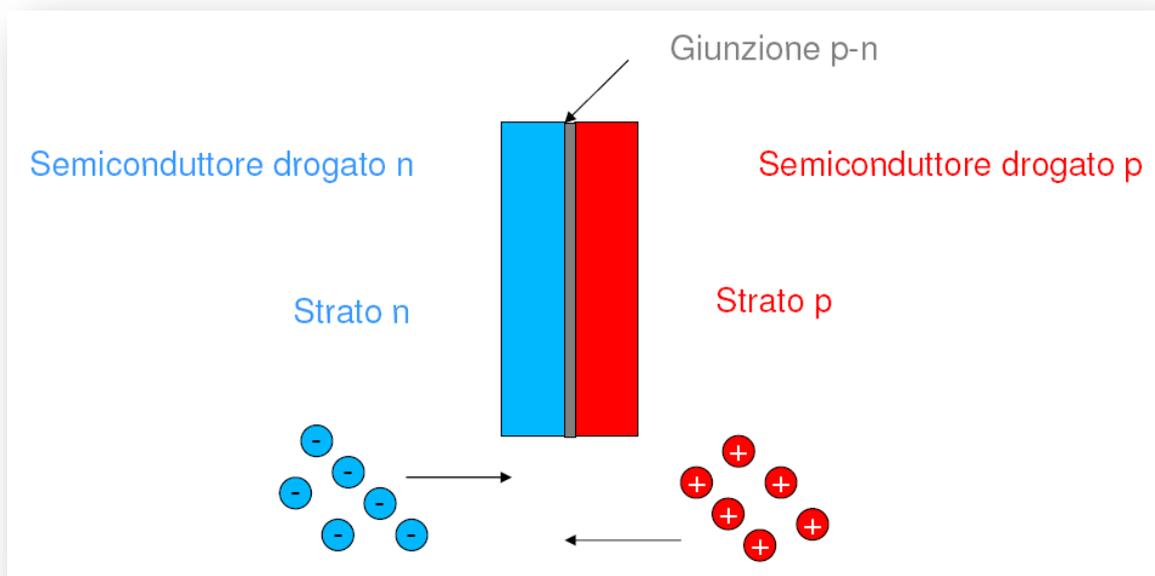


Figura 2.6: Rappresentazione giunzione pn

Gli elettroni liberi nello strato n si muoveranno verso lo strato p, che presenta siti liberi in cui gli elettroni possono inserirsi, le così dette lacune. Analogamente le cariche positive presenti nello strato p tenderanno a muoversi verso lo strato n il cui le lacune possono essere occupate da elettroni. Quindi si origina un processo di diffusione grazie al quale le cariche positive in eccesso migrano dallo strato p allo strato n, mentre le cariche negative migrano dallo strato n allo strato p.

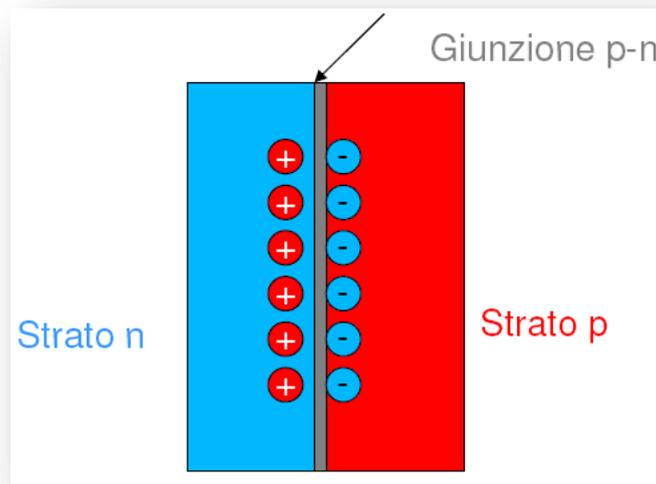


Figura 2.7: Diffusione degli elettroni nella giunzione pn

Nella regione di interfaccia dei due materiali si crea, così, un campo elettrico che diventa sempre più grande man mano che le lacune e gli elettroni continuano a diffondere verso i lati opposti. Il processo continua finché il potenziale elettrico diventa di una grandezza tale da impedire l'ulteriore diffusione di elettroni e lacune.

Grazie al raggiungimento di tale equilibrio si creerà un campo elettrico che permarrà senza l'aiuto di ulteriori campi elettrici esterni.

A questo punto è possibile spiegare l'effetto fotovoltaico. Infatti si supponga che un fotone (particella costituente un raggio solare) entri nella regione di tipo p del materiale. Se il fotone ha un'energia maggiore della band gap, cioè dell'energia minima richiesta per rompere un legame del reticolo del silicio, esso sarà assorbito e permettendo di creare una coppia elettrone-lacuna. L'elettrone così liberato si muoverà verso lo strato n a causa del potenziale elettrico.

Se invece un fotone entra nella zona n, la lacuna creata si muoverà verso lo strato p.

Tale flusso produrrà un accumulo di cariche positive sullo strato p e di cariche negative sullo strato n dando così origine ad un campo elettrico opposto a quello creato dal meccanismo di diffusione.

Quanti più fotoni arrivano alla giunzione, tanto più i campi tendono a cancellarsi l'uno con l'altro, fino ad arrivare al punto che non ci sarà più un campo interno che separerà ogni ulteriore coppia elettrone-lacuna.

È questa la condizione che determina la tensione a circuito aperto della cella fotovoltaica.

Ponendo degli elettrodi (contatti metallici) sulla superficie della cella si può infine utilizzare il potenziale che è stato creato.

Il meccanismo di conversione di energia solare in energia elettrica precedentemente descritto può essere rappresentato nella seguente figura:

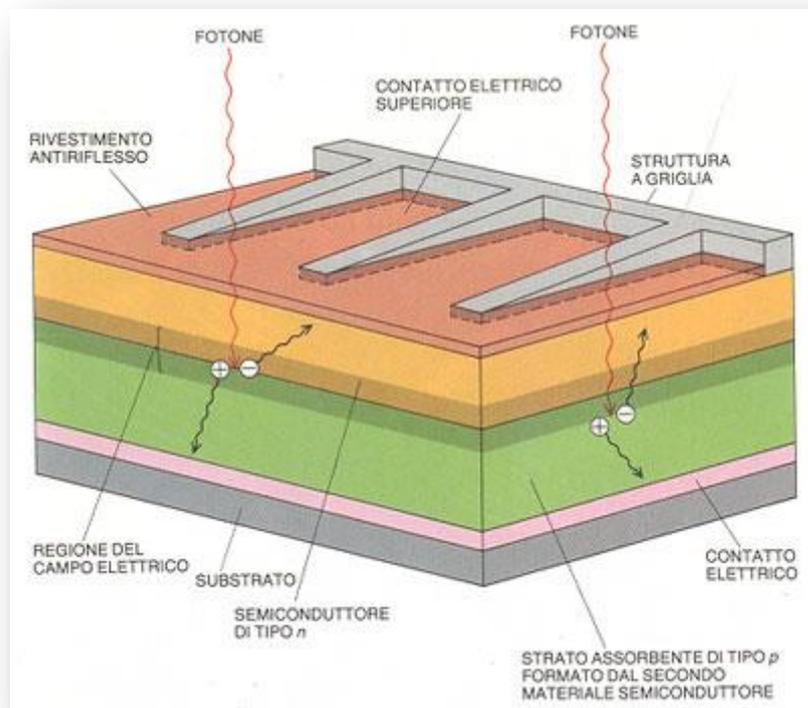


Figura 2.8: Spaccato di una cella fotovoltaica

2.3. Principali componenti di un impianto fotovoltaico

Con il termine “Impianto Fotovoltaico” o più in generale “Sistema Fotovoltaico” s’intende un complesso di elementi che consentono la conversione diretta della radiazione solare in elettricità. Pertanto oltre ai pannelli fotovoltaici, rientrano nel sistema anche altre apparecchiature.

I possibili componenti principali di un impianto fotovoltaico sono i seguenti:

- Moduli

- Struttura
- Immagazzinatori di energia: batterie o serbatoi (solo se non connesso alla rete) contatore GSE, che calcola la quantità di energia elettrica prodotta dall'impianto e immessa nella rete pubblica
- Power Conditioner:
- Inverter
- Charge controller
 - Rectifier
 - Altri possibili generatori di energia
- Quadri e cavi elettrici

Vediamoli alcuni di questi nello specifico.

2.3.1. Moduli

L'unità di base del modulo fotovoltaico è la cella.

La tipica cella fotovoltaica è costituita da un sottile wafer, di spessore di $0,25 \div 0,35$ mm circa, di silicio mono o policristallino, opportunamente drogato. Essa è generalmente di forma quadrata e di superficie pari a circa 100 cm^2 , anche se le dimensioni delle celle possono variare per scelte progettistiche dei produttori dei pannelli

Un insieme di celle costituiscono un modulo, e più moduli formano le stringhe.

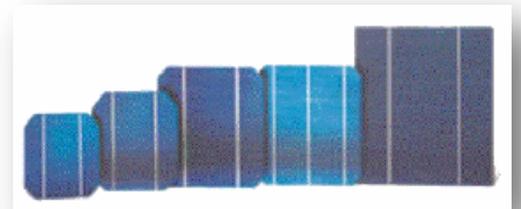


Figura 2.9: Celle fotovoltaiche

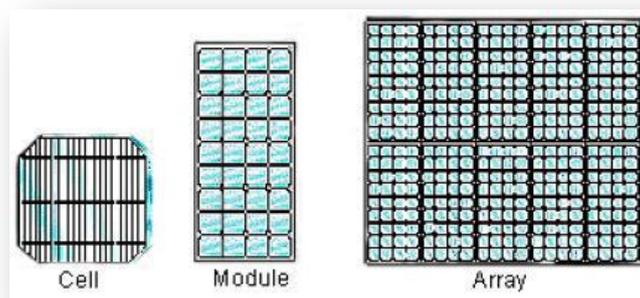


Figura 2.10: Pannello fotovoltaico

2.3.2. Strutture di sostegno

Le caratteristiche delle strutture di sostegno dei pannelli solari dipendono dalla tipologia della superficie in cui sono installati, dall'inclinazione necessaria per ottenere un buon rendimento dai pannelli, dalle dimensioni dell'impianto e dagli eventuali ostacoli all'insolazione diretta. Le strutture di sostegno dei pannelli sono di forma reticolare e

realizzate in materiali resistenti al peso quali l'acciaio inossidabile o l'alluminio anodizzato.

La struttura di sostegno di impianti a terra può essere di due tipi:

- Fissa: non permette alcun movimento del pannello;
- Mobile: permette al pannello di ruotare rispetto agli assi coordinare e cambiare la sua inclinazione in modo tale che la radiazione solare abbia sempre l'angolo di incidenza ottimale.



Figura 2.11: Strutture di sostegno

2.3.3. Batterie

Non in tutti gli impianti fotovoltaici è presente una sistema di accumulo, in quanto tale elemento non è strettamente necessario per il corretto funzionamento dell'impianto, ma risulta comunque fondamentale nel caso in cui si voglia accumulare l'energia prodotta. Le batterie sono tipicamente presenti negli impianto stand-alone, tali impianti non sono collegati alla rete elettrica nazionale, quindi utilizzano degli accumulatori per poter usufruire dell'energia prodotta in qualsiasi momento.

Le batterie più comunemente utilizzate sono quelle al Piombo-Cadmio e Piombo-Antimonio. Nel caso in cui la batteria sia soggetta a variazioni considerevoli di temperatura è meglio utilizzare quelle al Nickel-Cadmio.

2.3.4. Inverter

I moduli fotovoltaici trasformano energia solare in energia elettrica continua, ma la rete, come ogni apparecchiatura di uso comune, utilizza corrente alternata. Per trasformare la corrente continua in corrente alternata si utilizza l'inverter. L'inverter fotovoltaico è tecnologicamente più complesso e all'avanguardia di un normale inverter. Mediante l'impiego di particolari sistemi di controllo software e hardware l'inverter consente di estrarre dai pannelli solari la massima potenza disponibile in qualsiasi condizione meteorologica, questa funzione prende il nome di MPPT (Maximum Power Point Trackers). Il dispositivo, inoltre, mantiene costante la tensione in uscita indipendentemente dalle fluttuazioni di tensione del generatore, infatti il campo

fotovoltaico produce corrente in funzione dell'irraggiamento, mentre la rete necessita di un valore di corrente costante.

2.4. Funzionamento impianto fotovoltaico

L'insieme dei componenti dell'impianto fotovoltaico permette ad esso di produrre energia nel modo migliore possibile.

In un impianto fotovoltaico i pannelli che convertono solare in energia elettrica, sono connessi in serie formando le cosiddette "stringhe". Le stringhe sono, poi, connesse in parallelo tra loro per ottenere la potenza richiesta.

L'inverter, collegato a un numero definito di pannelli a seconda della sua potenza, converte in corrente alternata la corrente continua prodotta dai generatori e poi essa è immessa nella rete pubblica seguendo tutti i criteri stabiliti dalla normativa e dal gestore, oppure è inviata per l'autoconsumo al titolare dell'impianto fotovoltaico.

In un impianto connesso alla rete, oltre ai pannelli fotovoltaici e all'inverter, vi è un ulteriore dispositivo: il contatore. Esso permette di misurare la quantità di corrente che è immessa in rete e che potrà poi essere consumata dagli utilizzatori finali.

Il seguente schema offre una rappresentazione schematica di un impianto fotovoltaico connesso alla rete (grid connected):

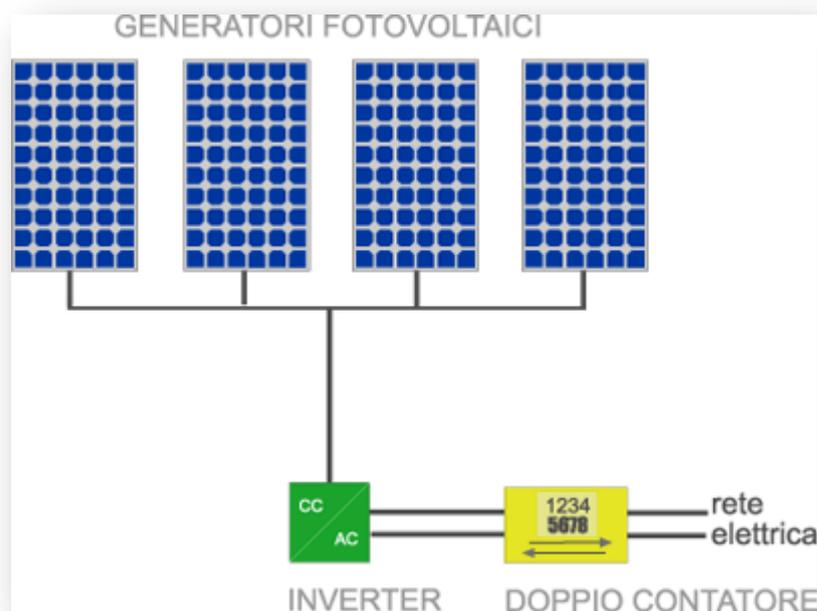


Figura 2.12: Rappresentazione schematica di un impianto fotovoltaico grid connected

2.5. Tipologie di pannelli fotovoltaici

I pannelli fotovoltaici si distinguono per la potenza erogata e per tipologia.

Per definire la potenza dei moduli fotovoltaici, come anche delle caldaie e dei motori, non è possibile fare semplicemente riferimento ad un dato di potenza nominale, in quanto tale potenza cambia in funzione della variabilità della radiazione solare. Come unità di misura della potenza dei pannelli fotovoltaici si utilizza il watt di picco (Wp), che individua la potenza istantanea erogata da un modulo in condizioni standard di irraggiamento: 1.000 W/m² di radiazione solare e 25 °C di temperatura.

Oltre alla potenza di picco caratteristica di ogni pannello, essi si distinguono l'uno dagli altri grazie alla tipologia che fornisce loro peculiarità diverse.

Le tecnologie fotovoltaiche sono in continua evoluzione e la ricerca evolve verso materiali sempre più efficienti, economici ed eco-compatibili. Infatti, oltre ai classici pannelli fotovoltaici (monocristallini, policristallini e amorfi) gli studi in questo campo hanno permesso la nascita di nuove tipologie di pannelli fotovoltaici.

Di seguito è riportata una classificazione delle principali tipologie di pannelli esistenti.

2.5.1. Moduli monocristallini

Le celle fotovoltaiche monocristalline sono realizzate utilizzando un singolo cristallo di silicio; ed è proprio nella purezza del silicio utilizzato che risiede il motivo della loro alta efficienza.

L'omogeneità della colorazione dona a questi pannelli un aspetto gradevole, adatto per le varie applicazioni. La presenza di una superficie vetrata e di una cornice in alluminio assicura protezione e solidità al pannello.

Attualmente, tra tutte le tecnologie fotovoltaiche disponibili sul mercato, il pannello monocristallino è quello caratterizzato mediamente dalla più alta densità energetica, infatti essi presentano elevati rendimenti elettrici, variabili tra il 14 e il 17%.

Le prestazioni dei pannelli monocristallini si riducono all'incirca dell'1% l'anno. Mediamente, quindi, funzioneranno al 90% della propria potenza nominale dopo 10 anni e all'80% dopo 20 anni e così via.

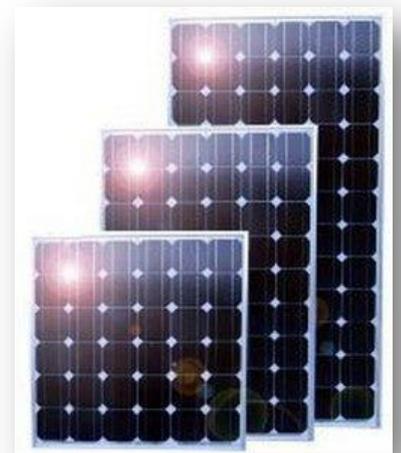


Figura 2.13: Pannelli monocristallini

I pannelli cristallini risultano molto sensibili sia alla presenza di ombreggiature, anche parziali, sia alla diminuzione della radiazione solare per condizioni di nuvolosità o di scarsa insolazione.

2.5.2. Moduli policristallini

Le differenze rilevanti tra i moduli monocristallini e i moduli policristallini sono due:

La differenza di efficienza;

Il colore delle celle fotovoltaiche.

I moduli policristallini presentano valori di efficienza variabili tra l'11% e il 14%.

La minore densità energetica del policristallino rispetto al monocristallino, in realtà deve essere verificata "sul campo": pannelli policristallini di ottima qualità possono avere rendimenti pari (se non superiori) a quelli di pannelli monocristallini di qualità medio-bassa.



Figura 2.14: Pannello policristallino

Le celle fotovoltaiche sono realizzate a partire da più cristalli di silicio, ricavati dal riciclaggio degli scarti dell'industria elettronica. L'accostamento di più cristalli dona a queste celle, e quindi all'intero modulo, una caratteristica colorazione blu cangiante.

2.5.3. Moduli in silicio amorfo

I moduli in silicio amorfo sono caratterizzati da rendimenti elettrici inferiori rispetto ai pannelli cristallini e imputabili al particolare processo produttivo con cui sono realizzati.

Nel caso del silicio amorfo è improprio parlare di celle fotovoltaiche: il silicio infatti viene depositato uniformemente e in piccolissime quantità su superfici plastiche o vetrate,

formando un unico film sottile o *thin film* dello spessore di qualche millesimo di millimetro.



Figura 2.15: Pannello in silicio amorfo

I moduli sono disponibili sia nella tradizionale struttura rigida, con telaio di rinforzo, sia in rotoli flessibili per impianti ad alta integrazione architettonica.

I pannelli in silicio amorfo hanno una colorazione omogenea, di solito nera o comunque scura, e hanno particolari doti di flessibilità e leggerezza.

Lo spessore complessivo del modulo, telaio compreso, è di pochi millimetri e l'aspetto è complessivamente più accattivante rispetto a quelli in silicio cristallino. Inoltre quando la radiazione solare incidente sui pannelli non è ottimale (nuvolosità, ombreggiature, ecc.), il silicio amorfo assicura una migliore resa energetica rispetto al silicio cristallino.

Tutte queste caratteristiche fanno del silicio amorfo la tecnologia ideale per applicazioni architettoniche avanzate, in cui è fondamentale ricercare la massima resa estetica anziché puntare unicamente sulla producibilità dell'impianto.

I moduli in silicio amorfo presentano bassi rendimenti elettrici, con valori compresi tra il 6 e il 10%, quindi il limite principale di tali moduli risiede proprio nella bassa densità energetica del materiale, che costringe all'utilizzo di ampie superfici. Inoltre, dopo alcuni mesi dall'installazione, i moduli subiscono un brusco calo di efficienza, pari circa al 20% e per il restante periodo di vita utile del modulo, il rendimento si mantiene intorno all'80% o poco meno, della potenza nominale. Va sottolineato che il calo di rendimento del silicio amorfo è un fenomeno previsto e ben conosciuto.

2.5.4. Moduli in film sottile

E' probabile che i tradizionali pannelli in silicio (monocristallino, policristallino, amorfo), che oggi dominano il panorama del fotovoltaico, a medio- lungo termine possano cedere importanti quote di mercato a pannelli realizzati con materiali innovativi.

Una caratteristica comune a tutte le nuove soluzioni fotovoltaiche è quella di essere realizzate con la tecnologia a film sottile o *thin film*.

I moduli in silicio amorfo sono attualmente l'unica tecnologia a film sottile pienamente affermata sul mercato.

La ricerca, però, si sta muovendo anche in altre due importanti direzioni:

i materiali semiconduttori di origine minerale alternativi al silicio

le celle organiche

Tra i moduli in film sottile sono maggiormente diffusi quelli costituiti da telluro di cadmio (CdTe) e in diseleniuro di indio-rame (CIS).

I moduli in CdTE sono una tecnologia particolarmente promettente, caratterizzata da buoni livelli di efficienza e da costi di produzione competitivi.

I moduli sviluppati fino ad ora presentano un'efficienza di circa il 10%, che in futuro potrà probabilmente essere portata fino al 20%. A differenza del cadmio puro, il telluro di cadmio è un materiale a bassa pericolosità, che può essere maneggiato senza rischi ma che comunque necessita di un corretto smaltimento e recupero.

La tecnologia CIS è una delle poche alternative al silicio ad avere già una certa diffusione commerciale. Grazie all'utilizzo di un substrato privo di silicio, i costi di produzione sono molto competitivi. I moduli CIS presentano caratteristiche interessanti, con valori di efficienza attorno al 10% e una buona stabilità nel tempo.

In particolare, offrono prestazioni superiori alla media in condizioni di scarsa luce e di basse temperature. Con l'aggiunta di gallio, si ottiene la tecnologia CIGS (diseleniuro di indio-rame-gallio), che presenta valori di efficienza ancora superiori rispetto al CIS.

2.5.5. Il fotovoltaico organico

Una delle frontiere più interessanti della ricerca sul fotovoltaico riguarda l'utilizzo di composti organici del carbonio.

Il principio di funzionamento delle celle organiche imita artificialmente il processo della fotosintesi clorofilliana.

Le sperimentazioni si stanno concentrando su un'ampia gamma di materiali, che vanno dai pigmenti a base vegetale, ai polimeri, a materiali ibridi organico/inorganico.



Figura 2.16: Pannello organico

L'aspetto più interessante delle celle organiche è che utilizzano al meglio le potenzialità della tecnologia a film sottile: i piccolissimi spessori, pari a pochi milionesimi di millimetro, permettono la realizzazione di pannelli su substrati plastici flessibili e leggeri.

Si tratta di moduli realizzabili con le metodologie proprie dell'industria della stampa, semplicemente depositando la pellicola fotovoltaica su ampie superfici, evitando tutti i dispendiosi ed energivori trattamenti richiesti dal silicio.

Oltre alle caratteristiche di leggerezza e di flessibilità, le celle organiche hanno il vantaggio di poter avere diverse colorazioni, favorendone l'applicazione su superfici di ogni tipo.

Considerando i continui progressi della ricerca, è difficile dare valori precisi sui rendimenti delle celle organiche, che variano anche a seconda della tecnologia e dei materiali utilizzati.

3. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA DEI RIFIUTI FOTOVOLTAICI

3.1. L'azienda S.A.BA.R. S.p.A.

S.A.BA.R. S.p.A. (Servizi Ambientali Bassa Reggiana) è una società per azioni a totale capitale pubblico i cui soci sono 8 comuni della bassa reggiana: Boretto, Brescello, Guastalla, Gualtieri, Luzzara, Novellara, Poviglio e Reggio.

L'attività a cui è dovuta la nascita di S.A.BA.R. S.p.A. nel 1994 è quella di raccolta e smaltimento in discarica dei rifiuti solidi urbani degli 8 comuni soci.

Oggi la sede S.A.BA.R. S.p.A. consta in un'area di 700.000 m², all'interno della quale si trovano, oltre alla discarica, altre attività legate alla selezione e pressatura di rifiuti



Figura 3.1: S.A.BA.R. S.p.A.

riciclabili (carta, cartone, polimeri,...) e alla produzione di energia termica ed elettrica da fonti rinnovabili.

La nobile attività di S.A.BA.R. S.p.A. nel produrre energia da fonti rinnovabili sottolinea l'attenzione che questa azienda riserva alla tutela e salvaguardia dell'ambiente. In particolare essa vanta un impianto di cogenerazione a quattro motori della

potenza di 1 MW l'uno alimentato dal biogas estratto dai bacini della discarica e tre impianti fotovoltaici: il primo realizzato sul tetto del capannone che racchiude le attività di selezione e pressature della frazione secca dei rifiuti che consta di una potenza di 155,52 kWp e i successivi due impianti, ognuno da 1 MWp, installati sulla copertura dei bacini della discarica.

Proprio a causa della rottura di alcuni pannelli fotovoltaici durante le attività di realizzazione dei propri impianti e vista la natura dell'azienda S.A.BA.R. S.p.A., è nata l'esigenza di definire una procedura che permetta di recuperare i pannelli fotovoltaici inutilizzabili e visti come rifiuto.

Le ragioni che portano un modulo fotovoltaico a divenire rifiuto sono molteplici:

- difetti dovuti ad errori di produzione;
- scarti di produzione;

- rotture durante il trasporto e l'installazione;
- rotture o mal funzionamenti durante la loro vita utile;
- termine della vita utile degli stessi.

La possibilità che il pannello fotovoltaico diventi rifiuto per una qualsiasi delle ragioni elencate porta alla nascita del problema della gestione dei moduli nel loro post-morte.

Considerando come causa prevalente dell'origine di tali rifiuti il fine vita dei pannelli fotovoltaici, e stimata la loro vita utile a 25 anni, la gestione di un'elevata quantità di moduli sarà un problema che si presenterà preponderante nel prossimo futuro, vista l'ingente diffusione delle installazioni fotovoltaiche degli ultimi anni.

Effettuate tali considerazioni S.A.BA.R. S.p.A. intende prepararsi con largo anticipo ad affrontare la gestione dei rifiuti fotovoltaici, collezionando dati riguardo: lo sviluppo delle installazioni fotovoltaiche, i materiali componenti i moduli e le procedure economicamente più convenienti da attuare per portare a recupero i pannelli fotovoltaici con il minor impatto ambientale possibile.

3.2. Lo sviluppo del fotovoltaico nel mondo

In questi ultimi anni gli impianti fotovoltaici hanno visto la loro massima diffusione, basti pensare che nel 2011 in Italia sono stati raggiunti i 12,5 GW di potenza installata. Questo elevato incremento di installazioni è il frutto di obiettivi che ogni stato industrializzato si è prefissato al fine di ridurre le emissioni di gas serra in atmosfera, in linea con le prescrizioni del protocollo di Kyoto.

Il progresso del mercato del fotovoltaico è ancora più impressionante se si considera che l'Europa ha superato la soglia di 25,5 GW complessivamente installati al termine del 2010, buona parte dei quali installati nel corso dello stesso anno (12 GW, pari al 47% del totale). Nonostante la crisi economica, quindi, i tassi di crescita del fotovoltaico sono stati elevati. Confrontando la potenza fotovoltaica installata in Europa nel 2009 e nel 2010, quest'ultima è superiore del 103% rispetto all'anno precedente. Ampliando la visione e considerando l'installazione mondiale, quella relativa la 2010 è stata considerata nel complesso è l'area geografica leader per le installazioni fotovoltaiche, contando per circa il 67% del totale cumulato installato a livello mondiale e per l'80% dei nuovi impianti entrati in funzione nel 2010.

È bene non sottovalutare però i segnali di crescita delle altre aree geografiche.

3.1.1. Giappone

Il Giappone, terzo nella classifica mondiale per paesi, ha più che raddoppiato (da 480 MW a 1 GW) le installazioni di impianti fotovoltaici nel corso del 2010. Ciò che ha portato il Giappone al successo del fotovoltaico è stato il Programma nazionale di ricerca e sviluppo nel lontano 1974 permettendo al Paese di diventare leader nel settore fotovoltaico e creare un'industria che non ha pari nel mondo. Nel 2005 quasi il 50% delle celle prodotte nel mondo provenivano dal Giappone.



Figura 3.2: Tetti di case giapponesi

3.1.2. Stati Uniti

In questi anni gli USA hanno avuto una crescita leggermente inferiore rispetto ad alcuni paesi europei, ma finalmente hanno allargato la propria base di installazioni: non più soltanto in California (che comunque da sola è ancora responsabile di circa il 30% del totale del nuovo installato del 2010), ma anche in altri Stati come ad esempio il New Jersey (167 MW nel 2010, contro 57 del 2009) o il Nevada (61 MW contro 3 MW). Complice dell'aumento delle installazioni in California rispetto agli altri stati, è stato anche il calo dei prezzi dei moduli sul mercato residenziale californiano.

Una significativa spinta verso lo sviluppo delle installazioni fotovoltaiche è stato dato dal "Piano Obama" sulle rinnovabili, che porterà ad un'ulteriore crescita nel futuro.

Lo sviluppo del fotovoltaico negli Stati Uniti potrebbe essere molto superiore a quello che è attualmente, per due fondamentali motivi: il territorio statunitense è ricco di risorse consone allo sviluppo del fotovoltaico tra cui principalmente la disponibilità di vastissimi spazi su cui effettuare le installazioni, inoltre è da sottolineare l'esigenza sempre crescente di questo paese di attingere a nuove fonti di energia.

3.1.3. India

Un gigante che sta muovendo i primi timidi passi sul sentiero dell'energia solare è l'India che dovrebbe arrivare nel 2022 ad avere 20 GW di solare connesso in rete (tra fotovoltaico e termodinamico) e addirittura 100 GW al 2030. Nel 2009, quando il piano per lo sviluppo delle energie rinnovabili è stato lanciato il paese contava installazioni per soli 6 MW, circa lo 0,004% della potenza elettrica installata in totale, a fine 2011, secondo le previsioni dovrebbe raggiungere 300 MW.

Per far decollare l'industria locale l'India ha stabilito restrizioni sull'import: per i grandi progetti fotovoltaici, in una prima fase bisognerà usare solo moduli cristallini assemblati in India, mentre in una seconda fase dovranno essere di produzione domestica anche le celle.

3.1.4. Bangladesh

In Bangladesh il numero di famiglie che si alimentano grazie all'energia fotovoltaica ha superato la soglia del milione. Un dato impressionante, soprattutto se si considerano i tempi da record con cui il paese ha intrapreso il percorso di solarizzazione: la nazione è passata dai 7mila nuclei familiari possessori di un impianto solare nel 2002 ai circa cinque milioni di persone di oggi. La scelta di passare ad un'energia verde e rinnovabile come quella del sole nasce quasi come una svolta obbligata per il Bangladesh, dove circa il 60 per cento della popolazione, 150 milioni di persone, non ha accesso alla rete elettrica e dove la produzione nazionale non riesce a coprire una domanda che cresce di 500 MW l'anno.



Figura 3.3: Capanna in Bangladesh

3.1.5. Australia

Sarà costituito da circa 650 mila pannelli fotovoltaici e produrrà energia sufficiente per circa 45 mila nuclei familiari, con una riduzione annuale di emissioni pari a circa 400 mila tonnellate di CO₂. L'impianto di Moree è il primo importante passo per lanciare il fotovoltaico in Australia per la generazione di energia elettrica su larga scala e costituirà uno stimolo notevole per l'economia locale. L'impianto, che sarà realizzato nel nuovo Galles del Sud, ed in particolare nella regione delle Tablelands, sarà il più grande alimentato a fonte solare dell'Australia, ma anche uno dei più grandi del mondo. Il tutto a fronte di un piano di incentivazione al fotovoltaico, da parte del Governo Federale Australiano, pari a complessivi 1,5 miliardi di euro attraverso il programma denominato "Solar Flagships".

3.1.6. Europa

È certo l'Europa l'area geografica che ha mostrato nel corso del 2010 le dinamiche di maggior interesse. In primo luogo va messo in evidenza il declino della Spagna che, pur conservando nominalmente il secondo posto nella classifica mondiale, ma nel corso degli ultimi due anni ha visto installati meno di 200MW. La Spagna è un esempio in negativo del cambio di rotta troppo brusco nella politica di incentivazione, con l'introduzione di un tetto troppo basso per l'installazioni e tagli significativi alle tariffe incentivanti, che hanno portato nel giro di soli due anni ad un azzeramento delle prospettive di crescita nel campo del fotovoltaico.

Caso diverso è la Germania, dove a fronte di un calo delle tariffe in media del 10% in tre scaglioni nel corso del 2010, sono comunque stati installati nuovi impianti per una potenza intorno ai 7,3 GW (91% in più del 2009).

Le principali novità del 2010 a livello europeo vanno attribuite a Francia e Repubblica Ceca. Nel primo caso l'installato nel corso del 2010 ha superato quota 720 MW, in crescita di oltre il 300% rispetto all'anno precedente. Per la Repubblica Ceca, dove il mercato è costituito in gran parte da impianti piccoli e medi, la differenza dell'installato rispetto al 2009 è di 1.350 MW contro 470 MW, il che ha consentito a questo rappresentante dell'Europa dell'Est di raggiungere quasi gli USA per quanto riguarda la potenza complessivamente installata. Le previsioni per il futuro, tuttavia, non paiono essere positive, specialmente per la Francia, ove alcuni esperti sostengono che il biennio 2011-2012 sarà molto simile al biennio 2009-2010 della Spagna.

Sintetizzando i dati relativi agli anni 2009 e 2010 in una tabella, otteniamo:

Paesi	Potenza 2010 (MW)	Potenza 2009 (MW)	Potenza cumulata al 2010 (MW)
Germania	7.250	3.800	17.150
Spagna	100	80	3.700
Giappone	1.000	480	3.650
Italia	2.100 (6.050*)	720	3.276 (7.226*)
USA	880	450	2.560
Repubblica Ceca	1.360	470	2.400
Francia	720	200	1.025
Europa	11.950 (15.900*)	5.900	25.650 (29.600*)
Mondo	14.850 (18.800*)	7.700	38.350 (42.300*)

Tabella 3.1: Potenze installate in Europa negli anni 2009 e 2010 (*valori considerando anche gli impianti installati grazie al Decreto "Salva Alcoa")

Oltre ai dati riportati in tabella è da segnalare l'affacciarsi di nuovi Paesi Europei nel panorama fotovoltaico europeo. La Grecia dopo i soli 59 MW realizzati nel 2009, ha installato nel 2010 circa 150 MW, portando così a oltre 210 MW il totale installato.

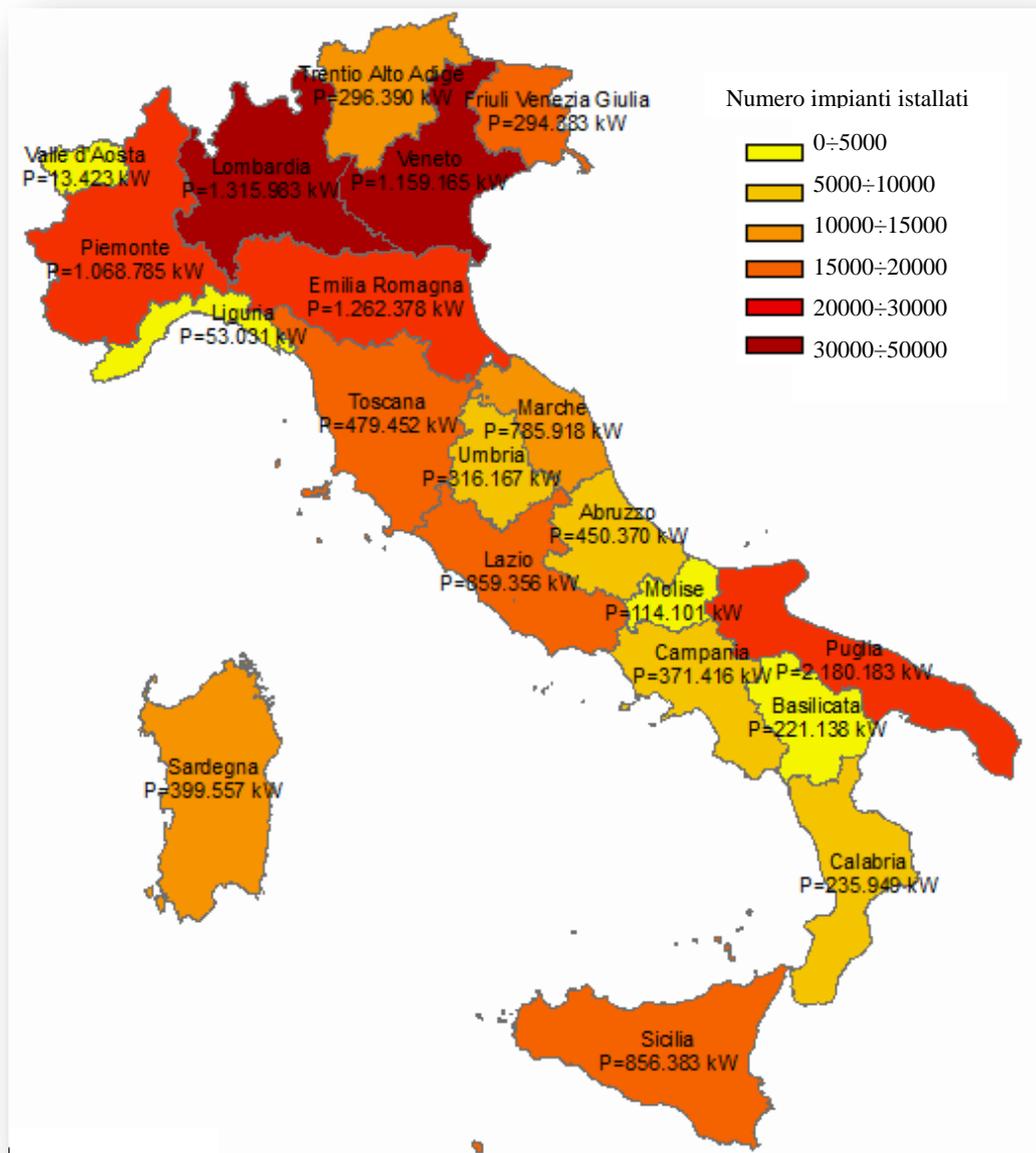
3.1.7. Italia

Negli ultimi anni la crescita del numero e della potenza degli impianti fotovoltaici è avvenuta a ritmi molto sostenuti.

Nell'anno 2010 il numero di impianti installati è raddoppiato rispetto al numero di impianti fotovoltaici installati nel 2009. Considerando gli impianti dal punto di vista della potenza installata la crescita avvenuta negli anni 2009 e 2010 è stata rispettivamente del 165% e del 203% se paragonati alla potenza installata nel 2008. La crescita è aumentata fino ad arrivare a 12.500 MW di potenza installata a fine 2011.

In particolare, la potenza è cresciuta più che proporzionalmente rispetto alla numerosità, in quanto sono entrati in esercizio impianti di dimensioni più grandi.

La mappa seguente riporta sia la distribuzione regionale della potenza fotovoltaica installata che il numero di impianti installati in ogni regione. Si può sottolineare che il primato di regione spetta alla Puglia che vanta una potenza installata di circa 2100 MW prodotti da 22700 impianti, essa è seguita dal Veneto con una potenza di 1300 MW e un numero di impianti pari a 44700, invece la regione che presenta la minima potenza nazionale è la Valle D'Aosta con 13 MW installati, prodotti da circa 1000 impianti.



Distribuzione regionale della potenza fotovoltaica installata (anno 2011)

Un'osservazione più approfondita delle installazioni fotovoltaiche italiane, porta ad affermare che la provincia più virtuosa sia Lecce con 572.153 kWp installati seguita da Brindisi (457.075 kWp), Cuneo (401.022 kWp) e Bari (345.707 kWp). In coda alla classifica delle province italiane troviamo Genova con soli 9200 kWp installati. Ciò sottolinea ulteriormente come la Puglia sia la regione con la maggior potenza fotovoltaica installata.

3.2. Sintesi della normativa

La recente diffusione delle installazioni fotovoltaiche in Europa è il frutto delle normative varate dall'Unione Europea il cui obiettivo principe è la riduzione dei gas serra emessi in atmosfera.

Per capire meglio quali siano gli strumenti legislativi che hanno permesso, negli ultimi anni, lo sviluppo delle installazioni fotovoltaiche verranno, nel seguito, descritte le principali normative europee e successivi decreti ministeriali italiani.

3.2.1. Il protocollo di Kyoto

Il protocollo di Kyoto, che fa seguito alla convenzione quadro delle Nazioni Unite, è uno dei più importanti strumenti giuridici internazionali volti a combattere i cambiamenti climatici. Esso contiene gli impegni dei paesi industrializzati a ridurre le emissioni di alcuni gas ad effetto serra, responsabili del riscaldamento del pianeta. Il protocollo di Kyoto viene adottato dalle Nazioni Unite l'11 dicembre 1997, mentre la Comunità europea lo recepisce solo nel 1998.

Il protocollo di Kyoto concerne le emissioni di sei gas ad effetto serra:

- biossido di carbonio (CO₂);
- metano (CH₄);
- protossido di azoto (N₂O);
- idrofluorocarburi (HFC);
- perfluorocarburi (PFC);
- esafluoro di zolfo (SF₆).

Globalmente, gli stati inclusi nell'allegato I della convenzione quadro (ovvero i paesi industrializzati) si impegnano collettivamente a ridurre le loro emissioni di gas ad effetto serra, nel periodo 2008-2012, per una riduzione delle emissioni totali di almeno il 5% rispetto ai livelli del 1990.

Esso rappresenta un importante passo avanti nella lotta contro il riscaldamento planetario perché contiene obiettivi vincolanti e quantificati di limitazione e riduzione dei gas ad effetto serra, inoltre da tale accordo derivano determinate normative atte a realizzare gli obiettivi fissati dal protocollo.

3.2.2. Legislazione Comunitaria. Direttiva 2001/77/CE

La comunità europea recepito il protocollo di Kyoto, ha individuato nello sviluppo dell'energia da fonti rinnovabili, una ottima soluzione per abbattere le emissioni in atmosfera, e a tal proposito ha emanato la direttiva del 2001/77/CE. Da questa direttiva si è sviluppata nel corso degli anni la produzione normativa italiana. Il legislatore comunitario, con la suddetta direttiva invitava i vari Stati Membri a porre in essere politiche volte ad accelerare le procedure amministrative per la realizzazione di impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili.

La direttiva 2001/77/CE viene poi modificata e abrogata a favore della direttiva 2009/28/CE.

3.2.3. Legislazione Nazionale. D.Lgs 387 del 2003

Il D.lgs 387/03 rappresenta la normativa nazionale di recepimento della direttiva comunitaria 2001/77/CE. Tale decreto non considera esclusivamente il fotovoltaico come fonte di energie rinnovabili, ma considera la totalità delle fonti rinnovabili.

3.2.4. Conto Energia

In seguito agli obiettivi fissati in sede europea, è divenuto necessario istituire in Italia un sistema di incentivazione per promuovere l'installazione di impianti fotovoltaici che consentissero di produrre energia pulita e, insieme alle altre fonti energetiche rinnovabili, di arrivare nel 2020 a costituire il 20% del fabbisogno nazionale di energia elettrica.

La legislazione italiana ha adottato come sistema di incentivazione per la produzione di energia elettrica da impianti fotovoltaici, il così detto Conto Energia. L'incentivo è riconosciuto sulla quantità di energia elettrica prodotta a partire dalla data di entrata in esercizio dell'impianto per la durata di vent'anni.

Il Conto Energia ha permesso lo sviluppo del fotovoltaico in Italia, e nasce come copia molto fedele del sistema di incentivazione per il fotovoltaico utilizzato in Germania che ha riscosso un grande successo e ha permesso di battere ogni record sugli obiettivi prefissati.

I conti energia che si sono susseguiti dal 2006 ad oggi e le potenze degli impianti incentivati da ognuno di essi sono sintetizzati nella tabella seguente:

	Numerosità Impianti	Potenza [MW]	Entrata in vigore del decreto
Quarto Conto Energia	82.108	4.410	12/05/2011
Terzo Conto Energia	38.122	1.592	31/12/2010
Secondo Conto Energia	200.693	6.568	19/02/2007
Primo Conto Energia	5.734	163	06/02/2006

Tabella 3.2: Impianti e potenza installata grazie ai conti energia (anno 2011)

A oggi, in totale, sono entrati in esercizio oltre 320mila impianti.

Inoltre è necessario tener presente che il numero e la potenza degli impianti incentivati dal Quarto Conto Energia può ancora aumentare.

Come già detto, alla fine del 2011 la potenza complessiva in esercizio in Italia ha raggiunto i 12.700 per un numero d'impianti intorno ai 320.000.

L'andamento delle installazioni per l'anno in corso proiettano di fatto l'Italia al primo posto nella graduatoria mondiale. Il nostro Paese, infatti, messo a confronto con la Germania, da oltre un decennio leader del mercato fotovoltaico mondiale, nel 2011 ha installato il triplo della potenza realizzata sul territorio tedesco.

Risulta necessario, ai fini della tesi, evidenziare un aspetto fondamentale contenuto nel decreto che definisce il Quarto Conto Energia. Secondo il Quarto Conto Energia: dal 30 giugno 2012 i produttori dei pannelli fotovoltaici sono tenuti a rilasciare ai proprietari d'impianto fotovoltaico realizzato un certificato che attesti la loro adesione a un sistema o consorzio europeo che garantisca il riciclo dei moduli fotovoltaici utilizzati al termine della loro vita utile.

L'incentivo del Quarto Conto Energia sulla produzione di energia elettrica di un impianto fotovoltaico viene elargito solo in presenza di questo certificato che assicura il futuro riciclaggio dei pannelli installati.

Viene, quindi, evidenziata la necessità di volgere uno sguardo al futuro dei moduli fotovoltaici, per evitare che questi, raggiunto il fine vita, vadano ad accrescere la quantità di rifiuti da destinare a discarica o a incenerimento, ma a favore della loro valorizzazione come materie prime seconde.

4. ACCUMULO DEI MODULI A FINE VITA

Nel 2008 in Europa si è raggiunta la cifra di 3.800 tonnellate di pannelli tra i rifiuti, nel 2020 si potrebbe arrivare a circa 35.000 tonnellate di rifiuti fotovoltaici da gestire se il trend di sviluppo delle installazioni rimane quello degli ultimi anni. Promuovere il riciclaggio non costituisce solo un beneficio per l'ambiente, ma rappresenta anche la possibilità di ridurre il volume complessivo di rifiuti e, al tempo stesso, la quantità di energia richiesta per la raccolta di materie prime. Tutto ciò comporta, pertanto, una riduzione significativa in termini di costi e impatto ambientale complessivi legati alla fase di produzione dei moduli fotovoltaici. Iniziative di raccolta e riciclaggio volontarie e finanziate dal produttore determinano, inoltre, un maggiore sostegno all'industria fotovoltaica da parte dell'opinione pubblica.

Quindi, considerando come vita utile dei pannelli fotovoltaici 20-25 anni e sottolineato il recente sviluppo delle installazioni fotovoltaiche in tutto il territorio Europeo, o semplicemente limitando l'osservazione al territorio italiano, nel prossimo futuro avremo una quantità considerevole di pannelli da avviare a recupero, in quanto la generazione di rifiuti derivanti da impianti fotovoltaici è direttamente correlata con la loro crescente diffusione.

L'azienda S.A.BA.R. S.p.A., operante nel settore dei servizi di igiene ambientale e consapevole di quanto una corretta gestione dei rifiuti sia importante, desidera conoscere con largo anticipo quali saranno le quantità e le tipologie di materiale fotovoltaico con cui dovrà rapportarsi nei prossimi anni, in modo tale da poter garantire una corretta ed economica gestione di tale tipologia di rifiuti nel rispetto dell'ambiente.

A tale scopo risulta utile un'analisi della situazione attuale, che evidenzii quali saranno le quantità di rifiuti fotovoltaici con cui ci si dovrà confrontare in futuro. Per effettuare l'analisi è necessario introdurre alcune ipotesi che non rechino alcun grave errore nella determinazione del risultato finale, in quanto l'obiettivo è definire l'ordine di grandezza della quantità di rifiuti fotovoltaici dovuti al fine vita dei moduli installati.

Le specifiche approssimazioni effettuate sono le seguenti:

- una quantità considerevole dei pannelli installati terminerà la propria vita utile fra meno di 25 anni, in quanto la realizzazione dei relativi impianti è avvenuta prima del 2011;
- la vita utile è considerata di 20-25 anni in quanto, dopo 20 anni dall'installazione cessano di essere validi gli incentivi erogati dallo Stato e

l'efficienza dei pannelli fotovoltaici cala del 20%, ma in realtà il pannello continua ad essere funzionante. La vita utile dei moduli è potenzialmente infinita in quanto non vi sono parti meccaniche in movimento, però a causa del naturale degrado dei materiali, le loro prestazioni tendono a diminuire nel tempo.

- oltre ai pannelli installati e arrivati a fine vita, concorrono a diventare rifiuti anche gli scarti di lavorazione propri dei processi produttivi, i pannelli che accidentalmente si rompono durante le fasi di trasporto e l'installazione;
- Inoltre, apparterranno alla categoria rifiuti anche i pannelli danneggiati da agenti atmosferici o mal funzionanti a causa di difetti di produzione. I difetti di fabbricazione, se presenti, si riscontrano nei primi mesi di funzionamento, ma sono molto rari.

Si può quindi concludere che stimare un dato corretto riguardo l'ammontare futuro di rifiuti derivanti dai moduli fotovoltaici è molto complesso e permeato da un elevato numero di elementi di incertezza.

I pannelli fotovoltaici installati attualmente si diversificano gli uni dagli altri grazie a delle caratteristiche che dipendono dall'azienda produttrice, quindi per effettuare l'analisi sarebbe necessario considerare tutti i modelli di pannelli installati in questi anni, ma risulterebbe un'analisi estremamente onerosa, inoltre reperire i dati corretti sarebbe impossibile. Risulta necessario riferirsi ad un pannello fotovoltaico fittizio, che abbia caratteristiche medie rispetto ai vari modelli di pannelli presenti sul mercato.

Osservando l'ampia gamma di pannelli che offrono le varie aziende produttrici operanti sul mercato internazionale, possiamo citarne alcuni:

Pannelli Fotovoltaici	Potenza nominale [Wp]	Peso [kg]
Monocristallino		
IS75P_Istar Solar	75	10,3
IS4000P_Istar Solar	220	19
IS4000P_Istar Solar	300	29
Neutron_Solar Pauer	55	12
Neutron_Solar Pauer	125	11,5
SYM50_Sunenergy	50	10,5
M300-72 AC_Solarwatt	300	29
M140-36 GET AK_Solarwatt	140	18
SPR-327NE-WHT-D_Sunpower	330	18,6
Policristallino		
HTGA80P Helios Tehnology	80	9,9
HTCB22M Helios Technology	135	11,4
IS50P_Istar Solar	50	8
IS4000P_Istar Solar	220	19
PROTON_Solar Power	225	25
SYM135P_Sunenergy	135	13
P120-60 GET AK_Solarwatt	245	26
Pyramid 54_Alfasolar	200	18,2
Pyramid 80_Alfasolar	320	26
Poly175_Schott Solar	175	24

Tabella 4.1: Elenco di alcuni pannelli fotovoltaici presenti sul mercato

I primi pannelli fotovoltaici installati avevano potenze nominali modeste. Lo sviluppo tecnologico degli ultimi anni ha portato le aziende produttrici a realizzare pannelli con potenze nominali molto più elevate.

Nell'analisi considereremo un pannello ideale che abbia una potenza pari a 180 W e un peso di 16 kg, che si rileva essere un pannello dalle caratteristiche medie rispetto ai moduli citati in tabella 4.1.

Date le seguenti ipotesi possiamo realizzare la tabella:

	Italia		Europa		Mondo	
	Valore	Unità di Misura	Valore	Unità di Misura	Valore	Unità di Misura
Ipotesi						
Peso 1 pannello	16	Kg	16	Kg	16	Kg
Potenza 1 pannello	0,18	kW	0,18	kW	0,18	kW
Dati						
Potenza totale installata	12.500.000	kW	28.000.000	kW	40.000.000	kW
Risultati						
Numero pannelli installati	69.500.000		156.000.000		2.230.000.000	
Peso totale pannelli installati	1.112.000	Ton	2.496.000	Ton	35.680.000	Ton

Tabella 4.2: Numero e peso complessivo dei pannelli installati in Italia e nel mondo (anno 2011)

Dai calcoli eseguiti in tabella 4.2 emerge come dato significativo la quantità di pannelli fotovoltaici installata ad oggi sul territorio mondiale, europeo e nazionale con il quale sarà necessario confrontarsi nei prossimi anni. Inoltre è bene sottolineare che parte di tali moduli fotovoltaici raggiungeranno il loro fine vita in un futuro recente, considerando che alcune installazioni hanno già terminato o stanno per terminare la loro vita utile.

Come già evidenziato dalla tabella le quantità di materiale ammontano a un peso di circa 36 milioni di tonnellate considerando il territorio mondiale, 2,5 milioni per l'Europa e ben 1.112.000 ton per il territorio nazionale.

Ulteriore aspetto utile da considerare per migliorare l'analisi è il mix di tipologie di pannelli fotovoltaici diffusi nel mondo in quanto ogni tipologia presenta caratteristiche distintive.

La distribuzione percentuale del mercato mondiale delle differenti tecnologie per i moduli fotovoltaici è la seguente:

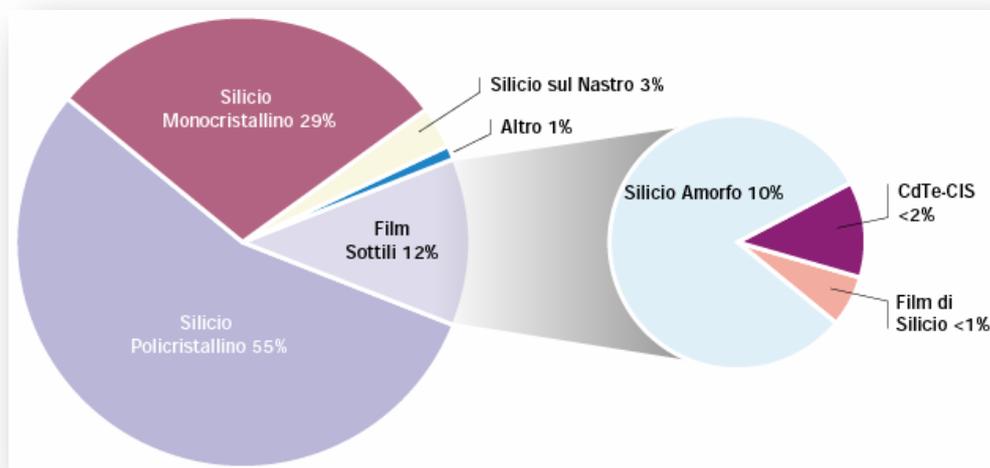


Figura 4.1: Distribuzione percentuale delle tipologie di pannelli fotovoltaici nel mondo

La tipologia di pannelli maggiormente diffusa è quella in silicio cristallino, nello specifico la percentuale di policristallino è 55% mentre di monocristallino è 29%.

Inoltre un 12% dei moduli installati nel mondo è costituito da pannelli in film sottile. Tali pannelli in film sottile possono essere ulteriormente suddivisi in sottocategorie: i pannelli a film sottile in silicio amorfo ammontano al 10%, mentre il restante 2% è costituito da pannelli in CdTe-CIS e in film di silicio.

In particolare risulta interessante analizzare la diffusione delle varie tipologie di impianti in Italia.

Il seguente grafico a barre mostra il dato percentuale regionale della potenza classificato per tipologia di pannello fotovoltaico utilizzato.

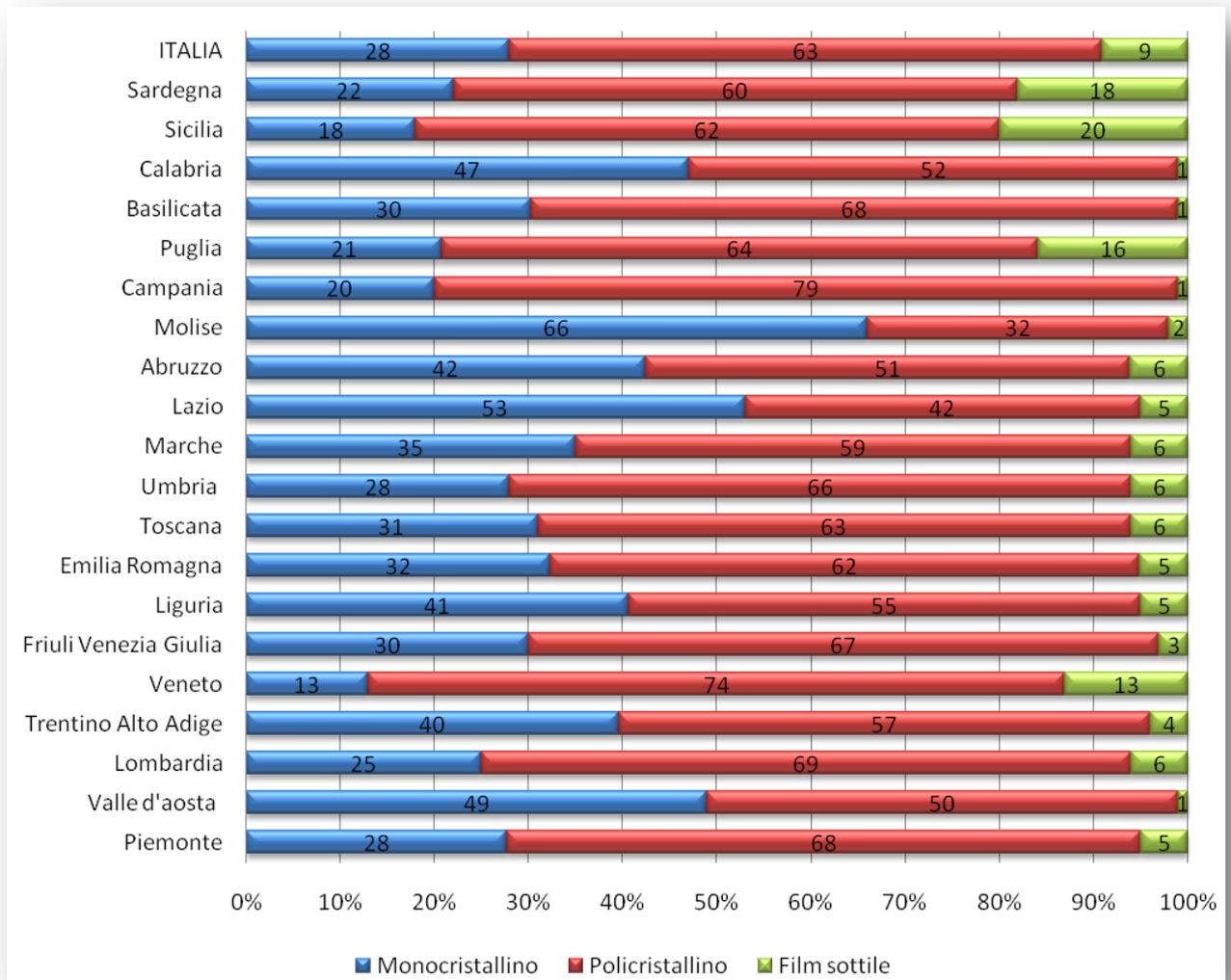


Figura 4.2: Ripartizione regionale della potenza per tipologia di pannelli fotovoltaici

La figura 4.2 evidenzia ulteriormente l'assunto secondo il quale i moduli maggiormente utilizzati sono quelli di tipologia policristallina, infatti ciò è vero anche per l'Italia.

Considerando le percentuali di tipologie di pannelli definite fino ad ora e la quantità di pannelli totali installati possiamo riassumere il tutto nella seguente tabella:

	Italia				Mondo			
	%	Potenza [kW]	Numero pannelli installati	Peso pannelli [Ton]	%	Potenza [kW]	Numero pannelli installati	Peso pannelli [Ton]
Tipologia pannelli								
Monocristallino	28%	3.500.000	19.460.000	311.360	29%	11.600.000	646.700.000	10.347.200
Policristallino	63%	7.875.000	43.785.000	700.560	55%	22.000.000	1.226.500.000	19.624.000
Film Sottile	9%	1.125.000	6.255.000	100.080	16%	6.400.000	356.800.000	5.708.800

Tabella 4.3: Potenza, numero e peso dei pannelli in Italia e nel mondo suddivisi per tipologia

Otteniamo, così, dati più particolareggiati riguardo i materiali di rifiuti fotovoltaici con cui sarà necessario confrontarsi.

La classificazione delle quantità di materiale fotovoltaico secondo la tipologia dei moduli risulta molto utile, in quanto ogni tipologia presenta caratteristiche differenti, e in particolare essi presentano materiali costituenti diversi, che molto probabilmente andranno gestiti in modo separato una volta divenuti rifiuti.

5. PROCESSO DI ANALISI DEI MATERIALI COSTITUENTI I MODULI FOTOVOLTAICI

5.1. Pannelli fotovoltaici utilizzati

La letteratura fornisce molteplici informazioni relative alla composizione dei pannelli fotovoltaici.

Purtroppo però i moduli fotovoltaici hanno caratteristiche distintive a seconda della casa produttrice e in particolare si diversificano per i materiali utilizzati per realizzarli. Quindi i dati di letteratura, che considerano una tipologia di pannello medio che contiene le caratteristiche generali di più pannelli, presentano sicuramente una percentuale di imprecisione. Risulta, quindi, di grande interesse svolgere analisi approfondite su pannelli reali grazie ai quali si possono quantificare i materiali che realmente li compongono e che gli permettono di svolgere al meglio le loro funzioni.

In questo lavoro di tesi sono state considerate tre tipologie di pannelli fotovoltaici che sono quindi stati disassemblati e caratterizzati presso il DIMA (Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e dell'Ambiente) dell'Università di Modena e Reggio Emilia.

I pannelli fotovoltaici utilizzati nello studio sono stati forniti dalla società S.A.B.A.R. S.p.A. (pannello monocristallino) e dall'azienda ELECTRIC WORLD S.r.l. (pannelli policristallino e in silicio amorfo).

5.1.1. Modulo monocristallino: TDB 125X125-72-P 180W

Il modulo monocristallino utilizzato per le prove di laboratorio è un prodotto della Sun Earth NINGBO SOLAR ELETTRIC POWER di potenza 180Wp.

Le caratteristiche descritte nella scheda tecnica sono le seguenti:

TDB 125X125-72-P 180W		
Caratteristiche elettriche	Valore	Unità di Misura
Potenza di picco	180	Wp
Tolleranza su potenza di picco	-3 ÷ +3	%
Efficienza del modulo	14,1	%
NOCT	47°C (± 2°C)	°C
Coeff. Di temperatura Voc	-0,35 (± 0,02)	%/°C
Coeff. Di temperatura Isc	+ 0,04 (± 0,015)	%/°C
Caratteristiche meccaniche	Valore	Unità di Misura
Tipo celle	Monocristalline	
Dimensione celle	125 x 125	mm
Numero di celle	72 (in serie)	
Forma celle	quasi quadrata	
Lato anteriore	Vetro	
Spessore vetro frontale	3,2	mm
Massa	16	kg
Telaio	Alluminio	
Incapsulamento celle	EVA	
Lato posteriore	TPT	
Condizioni operative	Valore	Unità di Misura
Carico massimo superficiale	200	Kg/m ²
Diametro massimo di grandine	25	mm

Tabella 5.1 : Scheda tecnica pannello monocristallino TDB 125X125-72-P 180W

Si evidenzia il peso del pannello che ammonta a 16 kg e le celle risultano essere di forma quadrata (125x125 mm) e in quantità di 72 per ogni modulo.

5.1.2. Modulo Policristallino: ZN shine solar ZN280

Il pannello policristallino considerato è realizzato dalla ZN SHINE SOLAR, le cui caratteristiche principali sono :

ZN shine solar ZN280		
Caratteristiche elettriche	Valore	Unità di Misura
Potenza di picco	280	Wp
Tolleranza su potenza di picco	0 ÷ +3	%
Efficienza del modulo	14,42	%
Caratteristiche meccaniche	Valore	Unità di Misura
Tipo celle	Policristalline	
Dimensione celle	156x156	mm
Numero di celle	72 (6x12)	
Dimensioni modulo	1957x992x50	mm
Vetro temprato	Alta trasparenza, Basso contenuto di Fe	
Spessore vetro temprato	3,2	mm
Massa	27	kg
Telaio	Lega di alluminio anodizzato	
Scatola di giunzione	IP65	
Cavi/Connettori	sezione 4mm ² , lunghezza 900mm	
Numero di diodi	6	
Parametri di temperatura	Valore	Unità di Misura
NOCT	47°C (±2°C)	°C
Coeff. Di temperatura di Pmpp	-0,421	%/°C
Coeff. Di temperatura di Voc	-0,33	%/°C
Coeff. Di temperatura di Isc	-0,055	%/°C

Tabella 5.2 : Scheda tecnica pannello policristallino ZN shine solar ZN280

Nel modulo Policristallino che presenta una colorazione bluastra, abbiamo 72 celle di dimensioni quadrate (156x156 mm) che permettono al modulo di avere una potenza complessiva che ammonta a 280kWp.

Il pannello completo della cornice in alluminio ha un peso di 27 kg.

5.1.3. Modulo in Silicio Amorfo: SHARP NA-F121G5

Il modulo in Silicio Amorfo ha come marchio la ditta SHARP e nella scheda tecnica le informazioni che sono di maggior interesse sono le seguenti:

SHARP NA-F121G5		
Caratteristiche elettriche	Valore	Unità di Misura
Potenza di picco	121	Wp
Efficienza del modulo	8,5	%
Coeff. Di temperatura Voc	-0,3	%/°C
Coeff. Di temperatura Isc	+0,07	%/°C
Caratteristiche meccaniche	Valore	Unità di Misura
Tipo celle	Cella tandem in silicio amorfo e monocristallino	
Massa	19	kg
Telaio	Alluminio	
Dimensioni pannello	1409x1009x46	mm
Caratteristiche termiche	Valore	Unità di Misura
Temperatura di utilizzo	da - 40 a 90	°C
Temperatura di stoccaggio	da - 40 a 91	°C

Tabella 5.3 : Scheda tecnica pannello in silicio amorfo SHARP NA-F121G5

Il pannello in silicio amorfo ha un peso complessivo di 19 kg ed è privo di celle, in quanto il silicio è stato depositato come uno strato uniforme che copre l'intera superficie utile del modulo.

5.2. Metodologia sperimentale di analisi dei materiali costituenti

L'obiettivo della fase sperimentale dell'elaborato è quello di ottenere l'esatta composizione dei pannelli fotovoltaici in termini di materiali costituenti, ed evidenziare le quantità dei materiali di maggior valore economico, per un eventuale recupero di essi nel post-morte dei pannelli fotovoltaici.

A tal fine è stato realizzato un processo che comprende le seguenti fasi:

- Disassemblaggio telaio in alluminio;
- Taglio delle celle fotovoltaiche;
- Separazione dei materiali costituenti il wafer;
- Analisi Termica Differenziale (DTA);
- Determinazione della densità dei vetri con picnometro a elio;
- Analisi con il Microscopio Elettronico a Scansione (SEM).

5.2.1. Disassemblaggio telaio in alluminio

Il pannello fotovoltaico è dotato di un telaio in alluminio che sorregge il modulo stesso e ne rende la struttura stabile. L'alluminio utilizzato per la cornice è alluminio anodizzato.

L'alluminio anodizzato si ottiene ponendo all'anodo l'oggetto da trattare e scaricandovi poi prodotti ossigenati. L'ossigeno che viene liberato causa la formazione sulla superficie di uno strato di ossido sottile e compatto che ha proprietà isolanti.

Proprio per le sue caratteristiche di isolamento e robustezza viene utilizzato come cornice per sigillare i moduli fotovoltaici, i quali devono sopportare durante la loro vita condizioni meteorologiche avverse di vario genere. L'utilizzo dell'alluminio anodizzato ne consente anche un agevole trasporto, installazione e massima sicurezza nel tempo.

Le cornici dei pannelli su cui sono state eseguite le analisi hanno le seguenti dimensioni:

Pannello fotovoltaico	Perimetro [mm]	Lunghezza lati corti [mm]	Lunghezza lati lunghi [mm]	Tipologia di serraggio
Monocristallino	4.730	805	1.560	Profilati a L e colla siliconica
Policristallino	5.898	992	1.957	Viti e colla siliconica
In Si Amorfo	4.836	1.009	1.409	Viti e colla siliconica

Tabella 5.4 : Dimensioni delle cornici in alluminio anodizzato

La cornice del modulo monocristallino è sprovvista di viti per il fissaggio, ma i quattro lati sono uniti grazie a dei profilati a L inseriti negli spigoli della struttura, inoltre la cornice è unita al modulo fotovoltaico grazie ad una colla/silicone. La cornice, in laboratorio, è stata staccata dal wafer fotovoltaico grazie a sollecitazioni meccaniche manuali.

La cornice del modulo policristallino e quella del modulo in silicio amorfo, invece, presentano delle viti che permettevano ai quattro lati di costituire una struttura stabile unita al wafer fotovoltaico con una colla siliconica. Inoltre il modulo policristallino presenta, oltre alla cornice di contorno, una sbarra di alluminio anche al centro del modulo, per rendere la struttura più stabile possibile, viste le dimensioni elevate.

Per la separazione della cornice dal wafer policristallino e dal wafer di silicio amorfo sono state eseguite sollecitazioni meccaniche manuali.

5.2.2. Taglio delle celle fotovoltaiche e separazione dei materiali componenti i wafer

Per eseguire le prove di laboratorio utili ad identificare le quantità e le tipologie di materiale presente in ogni pannello è stato necessario tagliare il modulo in pezzi di dimensioni pari alle celle del modulo stesso. Tale taglio di porzioni di modulo, o talvolta di porzioni di celle, è stato necessario in quanto gli strumenti di laboratorio possono lavorare con piccole quantità di materiale, viste le loro dimensioni contenute.

I tagli sono stati eseguiti con attrezzi manuali: il cutter ha permesso di incidere il polimero sul retro del pannello; il taglia vetro a punta diamantata, invece, è stato utilizzato per tagliare il vetro nella parte anteriore del modulo.



Figura 5.1 : Taglio di una cella fotovoltaica policristallina

Separata un'unica cella dal resto del modulo è stato necessario trovare una metodologia che permettesse di separare i vari strati di materiale componente.

Si è deciso di procedere mediante l'impiego di una tecnica di tipo criogeno che sfrutta un bagno in N_2 liquido in cui immergere il materiale e portarlo alla temperatura di $-190^\circ C$.

Grazie a tale bagno si tenta di raggiungere le temperature di transizione vetrosa dei polimeri e farli così passare dallo stato elastico tipico ad uno stato fragile. Dopo che il polimero è stato infragilito è stata sottoposta la frazione di modulo ad una sollecitazione meccanica che ha permesso di separare gli strati costituenti il wafer fotovoltaico.

In particolare, le prove di separazione degli strati eseguite sulle celle sono state due: una nella quale al bagno criogeno è seguita una sollecitazione meccanica; l'altra nella quale al bagno criogeno è seguita una separazione manuale dei materiali.

Nella prima prova dopo aver effettuato il bagno criogeno e aver applicato una sollecitazione meccanica, i materiali ottenuti sono risultati i seguenti:

1. Silicio + Polimero grigio
2. Pezzo di wafer rotto
3. Polimero grigio + polimero bianco
4. Polimero bianco

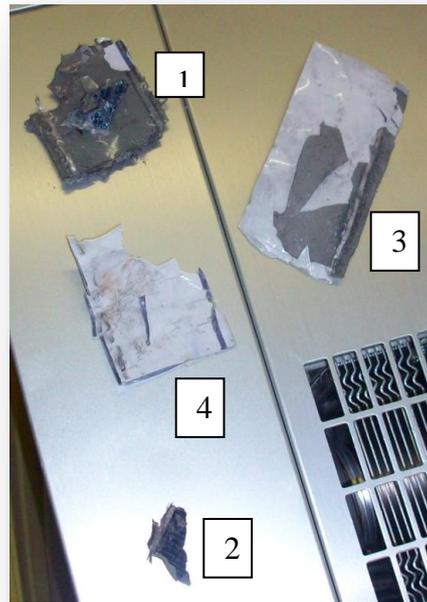


Figura 5.2 : Prodotti del bagno criogeno seguito da sollecitazione meccanica

Nella seconda prova dopo il bagno criogeno è stata eseguita una separazione manuale degli strati costituenti il wafer fotovoltaico, in particolare è stato possibile distinguere la componente posteriore polimerica dagli strati di vetro e silicio anteriori, come mostra la figura 5.3:



Figura 5.3: Prodotti del bagno criogeno seguito dalla separazione manuale degli strati

I materiali ottenuti dalle prove eseguite con bagno criogeno e sui quali poi si effettueranno ulteriori analisi, sono i seguenti:

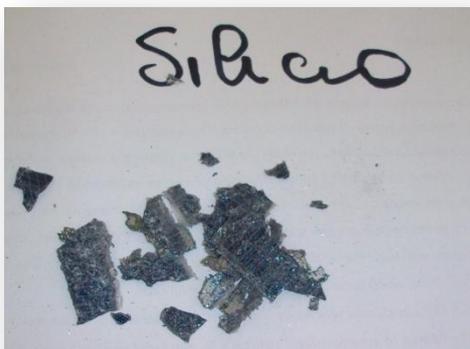


Figura 5.4 : Silicio

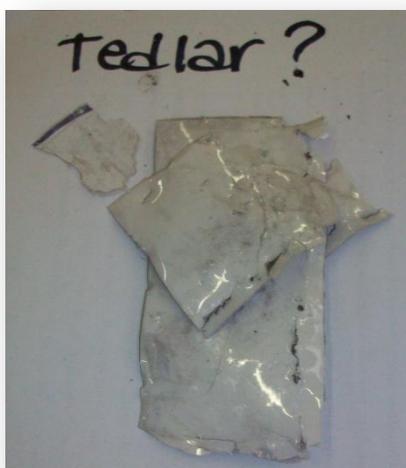


Figura 5.5 : Tedlar



Figura 5.6 : Vetro



Figura 5.6 : EVA

Un'analisi visiva del pannello non ha permesso l'integrale definizione dei vari strati costituenti, che saranno oggetto di ulteriori analisi, in particolare sono state effettuate l'analisi termica differenziale (DTA) e l'analisi con il microscopio elettronico a scansione (SEM).

5.2.3. Analisi Termica Differenziale (DTA)

L'Analisi Termica Differenziale (DTA) è utilizzata per indagare le trasformazioni endotermiche ed esotermiche accompagnate da variazioni di calore specifico. Tale analisi è stata eseguita esclusivamente sui vetri che appartengono ai pannelli fotovoltaici e su nessun altro materiale costituente.

La preparazione del campione per l'analisi termica differenziale consiste nel portare il campione di vetro in forma di polvere impalpabile, cioè della stessa consistenza del borotalco. La polvere è stata ottenuta mettendo in una giara d'agata i pezzetti di vetro e

sotto ponendo la giara stessa al moto di un gira-giara per circa 20 minuti. Quindi la polvere di vetro è stata compattata in un porta-campione di Platino, che è stato successivamente adagiato nello strumento. Il porta-campione è circondato da una resistenza elettrica e viene sottoposto a un gradiente termico costante. In relazione ad un riferimento inerte presente nello strumento, si misurano le variazioni di temperatura del

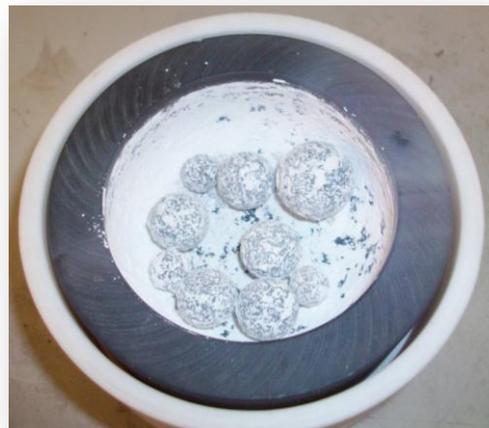


Figura 5.7: Giara d'agata contenente polvere di vetro

campione e quella del riferimento. La presenza di un delta di temperatura può essere relazionata alla presenza di fenomeni endotermici o esotermici nel campione stesso.

Ciò consente di determinare reazioni o transizioni di fase che si verificano all'interno del campione, poiché nel grafico Temperatura vs μ V/mg ogni reazione è caratterizzata da un punto di massimo o di minimo relativo o di flesso, come ad esempio transizione vetrosa o eventuali cristallizzazione e fusione. In particolare questa tecnica ci permette di misurare la temperatura di transizione di un vetro e le sue eventuali temperature di cristallizzazione e quella di fusione delle fasi cristalline formatesi.

I risultati ottenuti dall'analisi DTA dei vetri dei moduli fotovoltaici considerati verranno riportati nel capitolo seguente.

5.2.4. Determinazione densità dei vetri con picnometro a elio

Il picnometro è uno strumento per la misura della densità reale tramite il principio dello spostamento di gas. Il gas utilizzato per la misura è l'elio, la cui dimensione atomica ridotta gli consente di occupare tutta la superficie, compresi anche i pori più piccoli del



campione, con lo scopo di ottenere il volume reale occupato dal campione stesso. Il rapporto tra peso a secco del campione e volume misurato dal picnometro consente di ottenere la densità reale del materiale.

L'utilizzo dell'elio come gas di analisi è la scelta migliore per la sua alta conducibilità termica, che in

ambiente termicamente regolato consente di ottenere risultati molto precisi e in tempi rapidi. È possibile anche usare altri gas inerti qualora per la natura del campione non sia indicato l'elio.

Lo strumento, inoltre, è caratterizzato dalla possibilità di utilizzare una camera di misura il cui volume può variare in funzione della quantità di campione da utilizzare volta per volta.

Nella fase sperimentale il picnometro ad elio è stato utilizzato per definire la densità dei vetri costituenti i pannelli fotovoltaici, al fine di calcolare la quantità di vetro presente in ogni modulo trattato.

5.2.5. Analisi con il Microscopio Elettronico a Scansione (SEM)

Il SEM viene utilizzato per effettuare un'analisi micro strutturale dei materiali.

La microstruttura è la configurazione dei cristalli, dell'amorfo e delle porosità all'interno del materiale con ordini di grandezza pari ai micrometri. La possibilità di investigarla permette di definire alcune proprietà dei materiali o di ottenere spiegazioni su alcuni comportamenti particolari. Per indagare la microstruttura del campione che si vuole analizzare si utilizzano diversi tipi di microscopi elettronici ad elevata risoluzione del campione che si vuole analizzare. In particolare è stato utilizzato un microscopio elettronico a scansione.

La seguente figura 5.9 mostra un esempio di configurazione di un SEM:

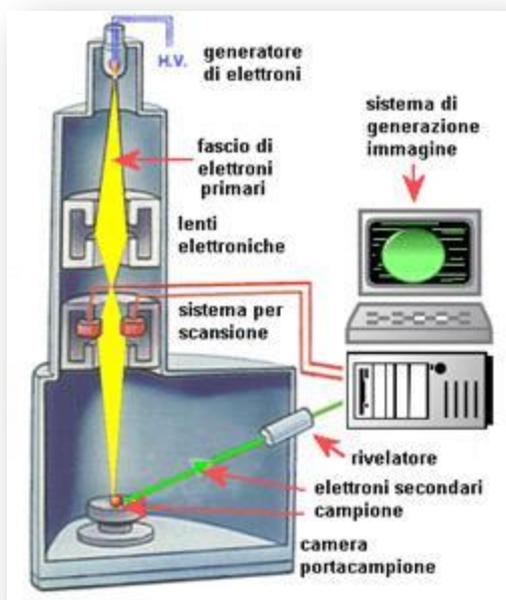


Figura 5.9: Schematizzazione SEM

Questa tipologia di strumenti si basa sul fatto che se un campione è colpito da un fascio di elettroni, a seconda della sua microstruttura, respinge una parte degli elettroni che lo colpiscono. Lo strumento è costituito da un generatore di elettroni che vengono

indirizzati sul campione attraverso lenti magnetiche e una sequenza di rilevatori di elettroni che attraverso un sistema di generazione immagini, permette di visualizzare l'immagine su uno schermo. Una parte degli elettroni del fascio sono riflessi per urto elastico dagli atomi che costituiscono la molecola. In questo caso si parla di elettroni retro diffusi (back scattered). Il numero di elettroni del fascio che vengono riflessi dipendono dal numero atomico dell'atomo: più sarà alto, più elettroni saranno riflessi e l'intensità registrata dal rilevatore sarà alta. Dunque il rilevatore restituirà un'immagine, in scala di grigi, che fornisce informazioni sulla composizione: maggiore sarà il numero atomico dell'elemento, più l'immagine risulterà chiara. Altri elettroni del fascio interagiscono con quelli degli atomi che costituiscono il primo strato di materiale estraendo gli elettroni costituenti. In questo caso si parla di elettroni secondari. L'immagine fornita dal rilevatore mostra la morfologia superficiale del campione dove il chiaro-scuro è determinato dalla differenza di profondità dalla superficie da cui provengono gli elettroni.

Nel momento in cui l'atomo torna al suo stato fondamentale emette raggi X, che se rielaborati da un apposito rilevatore permettono di ottenere informazioni in primo luogo qualitative ma anche semi-quantitative, sulla composizione chimica del campione. Per ottenere questi risultati si può procedere analizzando le lunghezze delle onde emesse con il metodo detto a dispersione di lunghezza d'onda (Wave Dispersion Spectroscopy, WDS), oppure l'energia dei raggi X con il metodo a dispersione di energia (Energy Dispersion Spectroscopy, EDS), che è quello utilizzato in questa analisi. Nel sistema EDS, i raggi X caratteristici sono suddivisi a seconda della loro lunghezza d'onda attraverso un cristallo analizzatore che sfrutta il fenomeno di diffrazione e la legge di Bragg. Il rilevatore fornisce un grafico intensità dell'onda in funzione dell'energia e della lunghezza d'onda. Per ottenere l'analisi semi-quantitativa del campione bisogna considerare che i conteggi dell'intensità sono proporzionali alla massa degli elementi presenti nel campione.

I microscopi elettronici sono essenzialmente di tre tipologie:

- SEM (microscopio elettronico a scansione): permette di ottenere immagini di campioni di elevato spessore anche non conduttivi;
- ESEM (microscopio elettronico a scansione ambientale): consente di scegliere l'ambiente in cui si analizza il campione al variare della temperatura, pressione, atmosfera della camera;

- TEM (microscopio elettronico a trasmissione): analizza campioni di dimensioni nanometriche.

Per effettuare le analisi dei materiali tramite il SEM (Microscopio Elettronico a Scansione) è necessario preparare correttamente il materiale da analizzare. In particolare i campioni sono stati incollati tramite pasta d'argento ad appositi stabs in alluminio. In seguito, dopo l'essiccazione della pasta d'argento, essi sono stati metallizzati con oro, poiché la tecnica richiede che i campioni siano conduttivi.

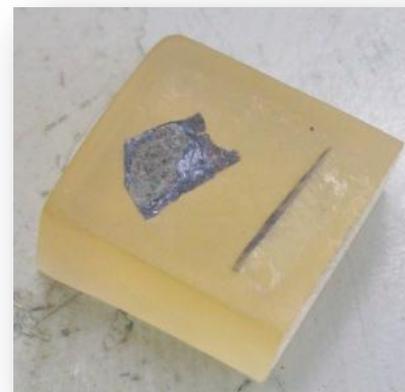


Figura 5.10: Campione inglobato in resina epossidica

Nel caso in cui l'incollaggio del campione sullo stab risulti difficile, è possibile inglobare i campioni in una resina epossidica.

Le resine utilizzate sono resine epossidiche a freddo e si ottengono mescolando bene 10 ml di resina con 4÷6 gocce di accelerante e 6÷12 gocce di indurente. Nel mescolare la miscela è necessario prestare attenzione a non includere bolle d'aria.

Dopo aver preparato la miscela di resina è bene collocare il campione da inglobare dentro uno stampino apposito con la superficie da esaminare rivolta verso il basso. Si procede poi colando lentamente la miscela nello stampino, sopra il campione, fino a raggiungere il livello desiderato, preferibilmente coprendo interamente il campione.

Il tempo di solidificazione della resina a temperature che variano tra i 16°C e i 22°C è di 20÷40 min, passato questo tempo la resina ha raggiunto la perfetta solidificazione.

Per rendere il processo di solidificazione più rapido si possono aumentare le gocce di accelerante e di indurente nella composizione della miscela.



Figura 5.11: Lappatrice

Dopo che la resina si è solidificata si toglie dallo stampino e si passa alla fase di lappatura.

La lappatura si utilizza per ridurre la resina intorno al campione e per lucidare la superficie da analizzare. La lappatura viene eseguita con dischi di granulometria diversa a seconda della tipologia di superficie che si vuole ottenere. Se si desidera asportare del

materiale per ridurre le dimensioni della resina si utilizza un disco più ruvido con alta granulometria, invece se si desidera lucidare la superficie si utilizzerà un disco con bassa granulometria, ad esempio i dischi in diamante.

I campioni in figura 5.12 sono relativi ai seguenti materiali appartenenti al pannello policristallino analizzato:

1. Campione con materiale conduttore;
2. Campione con vetro;
3. Campione in resina con vetro + silicio in sezione e in pianta;
4. Campione con silicio.

Le stesse tipologie di campioni sono stati preparati per i moduli policristallino e in silicio amorfo. Risultano di particolare interesse per le successive analisi al SEM i campioni con le cross section dei tre wafer analizzati, il cui scopo è quello di visualizzare contemporaneamente tutti i materiali componenti.

I risultati ottenuti dall'analisi tramite microscopio elettronico a scansione sono presentati nel capitolo successivo.

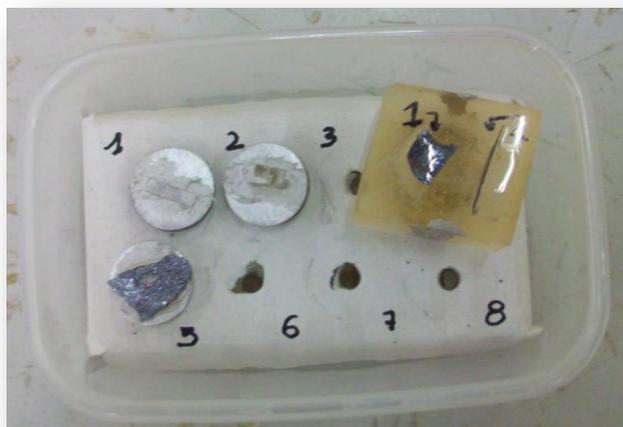


Figura 5.12: Campioni di pannello policristallino preparati per l'analisi al SEM

6. RISULTATI DELLE ANALISI MICROSTRUTTURALI

L'obiettivo della fase sperimentale dell'elaborato è quello di definire la composizione dei pannelli fotovoltaici resi disponibile per le prove di laboratorio dall'azienda S.A.B.A.R. S.p.A. e dall'azienda ELETRIC WORLD S.r.l.. L'analisi micro strutturale eseguita consta di due sotto analisi principali: l'Analisi Termica Differenziale e l'Analisi eseguita con Microscopio Elettronico a Scansione.

I risultati ottenuti grazie alle suddette analisi sono riportati nel seguito.

6.1. Analisi Termica Differenziale (DTA)

L'analisi DTA permette di individuare le transizioni di fase che avvengono all'interno di un materiale durante un ciclo termico. Nel caso specifico del pannello fotovoltaico, è stato necessario utilizzarla per studiare le temperature caratteristiche dei vetri, e valutare la fattibilità di un processo di riciclo del vetro. Di seguito si riportano le curve ottenute per i tre vetri:

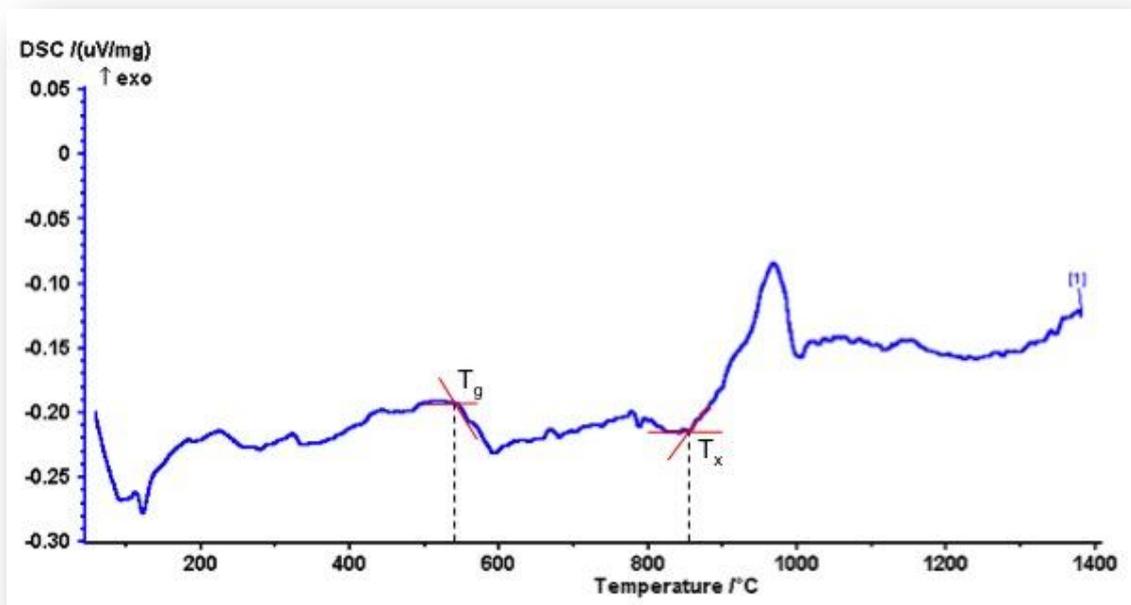


Figura 6.1: Vetro pannello fotovoltaico policristallino

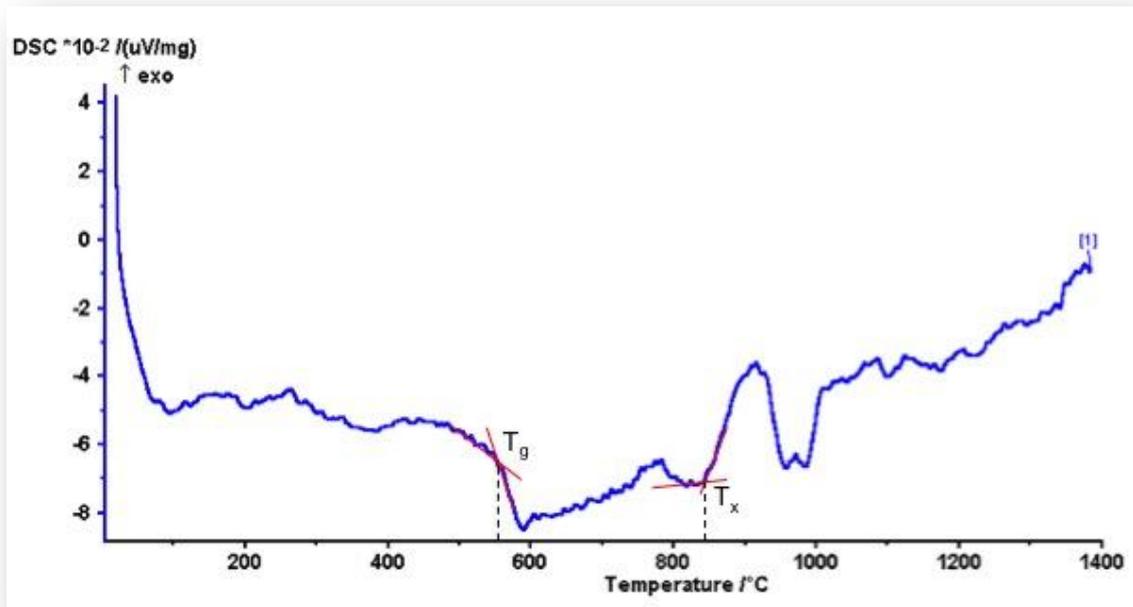


Figura 6.2 : Vetro pannello fotovoltaico

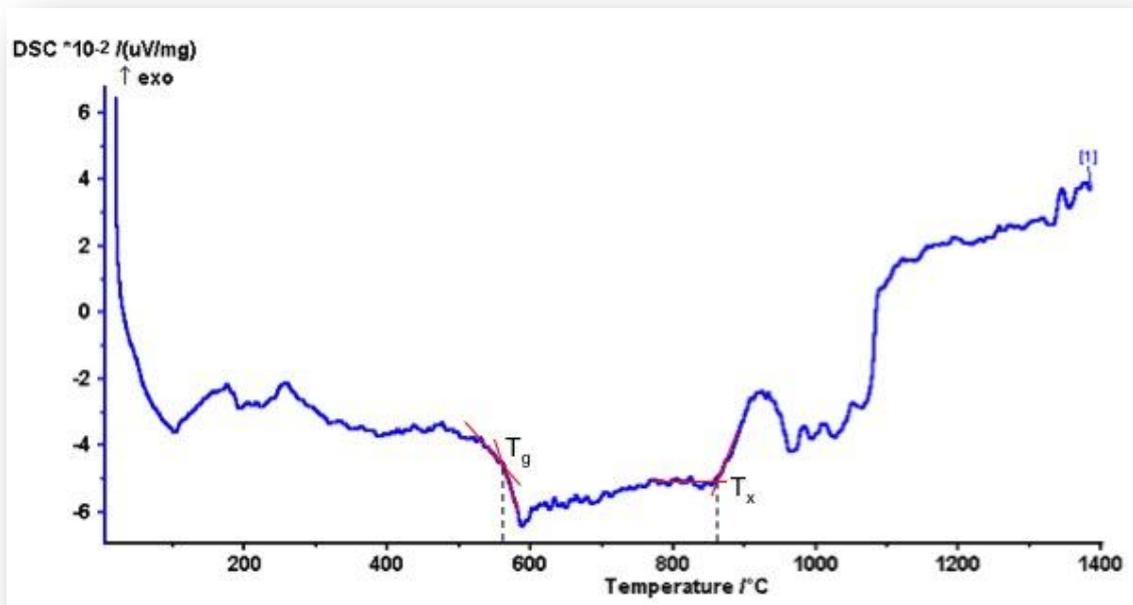


Figura 6.3 : Vetro pannello fotovoltaico in silicio amorfo

Dalle tre curve si possono ottenere diverse grandezze caratteristiche, le quali permettono di valutare la capacità di lavorazione del vetro in esame.

In particolare si possono definire:

la temperatura di transizione vetrosa (T_g) che risulta essere la temperatura alla quale si inizia ad osservare il flesso della curva legato alla transizione vetrosa;

la temperatura di cristallizzazione (T_c), che coincide con la temperatura dove si ha il massimo del picco positivo.

Oltre a queste due temperature caratteristiche si può definire la stabilità termica (ΔT) che consiste nella resistenza alla devettrificazione di un amorfo per nucleazione e processi di crescita. In particolare essa può essere definita come la differenza tra la temperatura di inizio cristallizzazione (T_x), che si misura alla base del picco, e quella di transizione vetrosa.

$$\Delta T = T_x - T_g$$

Nel caso in cui un vetro sia stabile, il picco di cristallizzazione è vicino alla temperatura di melting, mentre in un vetro instabile, il picco di cristallizzazione è prossimo alla temperatura di transizione vetrosa. Dunque, maggiore è il valore di ($T_x - T_g$), più il processo di nucleazione tarderà ad attivarsi, e quindi più facile sarà la formazione di vetro.

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva delle grandezze caratteristiche dei vari vetri analizzati:

	T_g (°C)	T_x (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)
<i>PV policristallino</i>	538	869	993	331
<i>PV monocristallino</i>	555	847.5	921	292.5
<i>PV amorfo</i>	562.5	862.5	932	300

Tabella 6.1 : grandezze caratteristiche

I tre vetri analizzati hanno temperatura di transizione vetrosa intorno ai 550°C dato conforme agli intervalli di temperature presentati dai vetri soda-lime. Inoltre la stabilità termica mostra range di temperatura intorno ai 300°C, fattore che permette al vetro di essere lavorato senza rischiare di innescare una prematura cristallizzazione.

Riassumendo, secondo l'analisi DTA i vetri impiegati nei moduli fotovoltaici sono vetri di tipo soda-lime, che una volta separati correttamente dagli altri componenti del pannello possono essere semplicemente riciclati come vetro comune.

6.2. Densità dei vetri ottenuta con il picnometro a elio

Il materiale preponderante nei pannelli fotovoltaici risulta essere il vetro e quindi merita un'attenzione particolare se si osserva il modulo in un'ottica di riciclo dei suoi materiali costituenti.

La quantificazione esatta del vetro presente nei moduli fotovoltaici sottoposti ad analisi, è stata possibile grazie alla determinazione della densità del materiale.

La densità dei vetri analizzati è stata definita utilizzando un picnometro a elio presente nei laboratori del DIMA.

I risultati ottenuti grazie al picnometro a elio sono i seguenti:

	Densità [g/cm ³]
Pannelli fotovoltaici	
Policristallino	2,4966
Monocristallino	2,4937
Silicio Amorfo	2,4925

Tabella 6.2 : Densità dei vetri

Considerando, oltre alla densità, i dati relativi agli spessori dei vetri e all'area occupata è possibile definire la quantità di vetro in g presente in ogni pannello.

	Densità [g/cm ³]	Spessore [cm]	Superficie [cm ²]	Volume [cm ³]	Peso vetro [g]	Peso tot pannello [g]	% Peso del vetro
Pannelli fotovoltaici							
Policristallino	2,4966	0,39	19.413,44	7.571,24	18.902,36	27.000	70,01%
Monocristallino	2,4937	0,32	12.558,00	4.018,56	10.021,08	16.000	62,63%
Silicio Amorfo	2,4925	0,36	14.216,81	5.118,05	12.756,74	19.000	67,14%

Tabella 6.3 : Dati relativi alle dimensioni dei vetri

Dai calcoli effettuati si evidenzia l'incidenza elevata del peso del vetro rispetto al peso totale del pannello fotovoltaico.

Il vetro risulta essere il materiale costituente presente in maggiore quantità e in fase di riciclo dei pannelli fotovoltaici può essere valorizzato come materia prima seconda. Ciò sottolinea ulteriormente l'importanza del recupero dei moduli al termine della loro vita utile sia dal punto di vista economico oltre che ambientale.

6.3. Analisi al SEM & EDS

Attraverso l'analisi SEM (Microscopio Elettrico a Scansione) è stato possibile ottenere informazioni sulla morfologia e sulla composizione dei vari strati che costituiscono il wafer fotovoltaico. I risultati ottenuti presentano differenze a seconda della tipologia di pannello sottoposto ad analisi.

6.3.1. Pannello Policristallino

Per il pannello policristallino si sono analizzati diversi campioni e in particolare:

- Sezione
- Conduttore
- Silicio
- Vetro

Si analizzeranno nel seguito i risultati specifici ottenuti da ogni campione.

Sezione

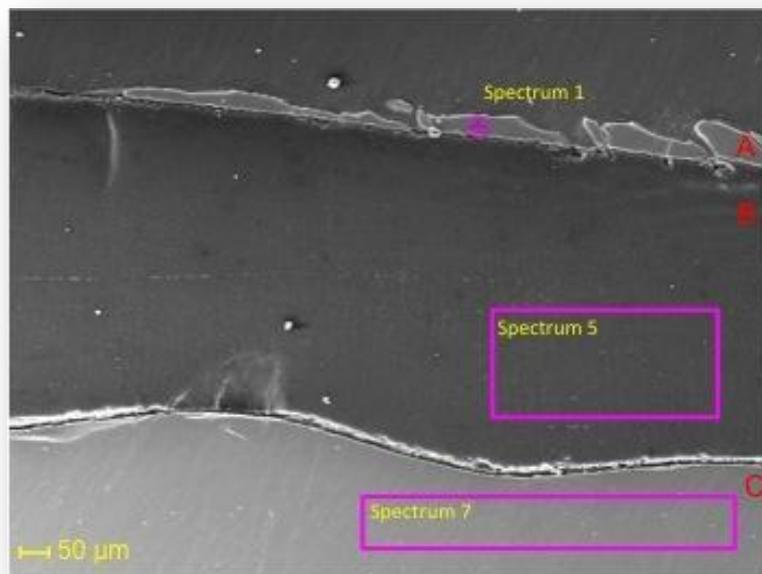


Figura 6.4 : Immagine SEM della sezione del pannello policristallino

La sezione in figura 6.4 mostra chiaramente i vari strati che costituiscono il sistema, in particolare si notano tre strati ben definiti. Attraverso l'analisi EDS, eseguita sul campione, i cui risultati sono riportati in figura 6.5, è stato possibile ottenere informazioni qualitative sulla composizione di questi layers.

Come si può osservare dallo spettro 1, lo strato denominato A è costituito in prevalenza da Silicio. Lo spettro 5, invece, evidenzia come il layer B intermedio sia di natura

polimerica, e da letteratura si può supporre che sia Etilenvinilacetato (EVA). Infine l'ultimo strato, il layer C, é vetroso e caratterizzato da una composizione associabile con quella di un vetro sodalime.

Una descrizione più precisa e dettagliata riguardo la composizione del vetro la si potrà dedurre dai risultati ottenuti dall'analisi al SEM del campione di vetro.

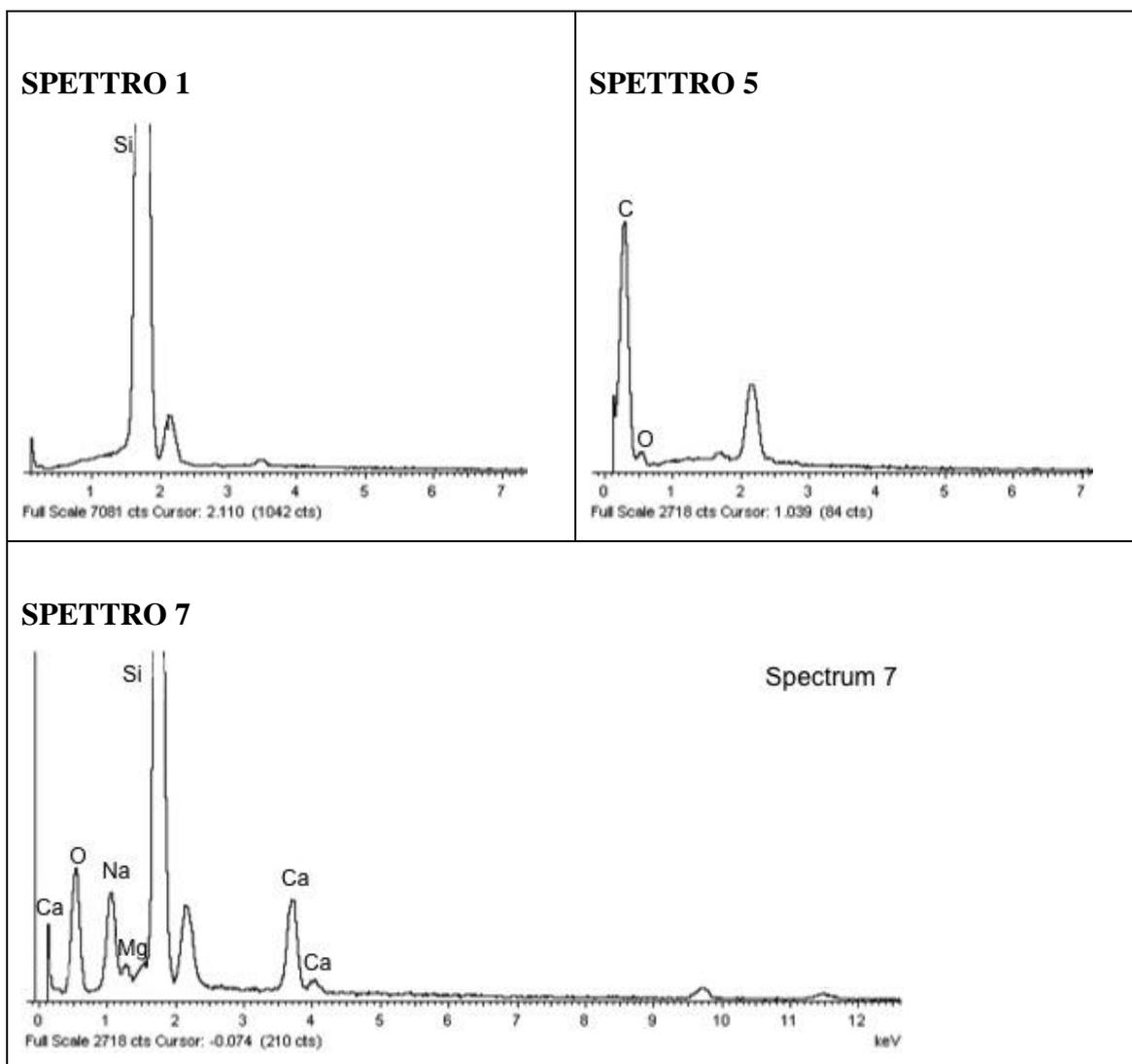


Figura 6.5 : Spettri EDS del campione della sezione

I campioni che mostrano la sezione della cella fotovoltaica sono i più interessanti in quanto forniscono una rappresentazione significativa degli strati di materiali costituenti i pannelli fotovoltaici.

Conduttore

Particolare attenzione é stata prestata al conduttore che attraversa il pannello in senso verticale. Differentemente da ciò che é stato riscontrato in letteratura, il conduttore é costituito da una lega di stagno e piombo. L'EDS ha permesso di valutare quale sia la composizione caratteristica della lega e attraverso lo studio statistico si sono ottenuti i seguenti risultati:

	Sn (%peso)	Pb (%peso)
Spettro 1	62.67	37.33
Spettro 2	64.19	35.81
Spettro 3	62.36	37.64
Spettro 4	62.67	37.33
Spettro 5	62.10	37.90
Spettro 6	62.01	37.99
Spettro 7	67.41	32.59
Spettro 8	64.96	35.04
Spettro 9	62.32	37.68
Spettro 10	62.40	37.60
Spettro 11	61.29	38.71
Spettro 12	59.30	40.70
Media	62.81	37.19
Dev.St	2.00	2.00
Min	59.30	32.59
Max	67.41	40.70

Tabella 6.4 : Composizione della lega conduttiva

Considerando la composizione media possiamo associare la lega del conduttore ad una lega eutettica, tipicamente caratterizzata da 63Sn-37Pb.

Le immagini ottenute con il fascio di elettroni retrodiffusi, confermano i risultati ottenuti con l'analisi EDS in quanto si osserva la particolare microstruttura bifasica tipica di questa tipologia di lega.

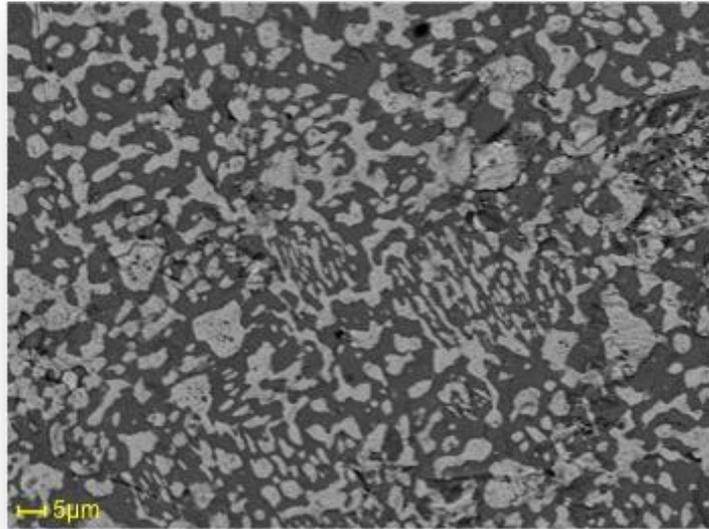


Figura 6.6 : Immagine SEM del conduttore del pannello policristallino

Nell'immagine (figura 6.6) la parte di materiale con colorazione più chiara rappresenta il componente di lega che a causa della sua maggior pesantezza riflette una quantità di elettroni superiore, nello specifico si tratta di piombo. Viceversa, la parte di materiale che nell'immagine risulta essere più scura corrisponde al componente di lega più leggero e quindi lo stagno.

La presenza del piombo all'interno della lega usata come conduttore nel pannello fotovoltaico policristallino porta ad effettuare alcune osservazioni.

Nel 2002 la Comunità Europea emana la normativa RoHs (2002/95/CE) che pone delle restrizioni sull'uso di sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche.

La norma europea è recepita nel nostro ordinamento con il D.Lgs. 151/2005 e impone ai produttori e alle imprese della relativa subfornitura di adeguarsi alle prescrizioni entro il 1° luglio 2006.

Da tale data le apparecchiature elettriche ed elettroniche immesse sul mercato non devono contenere piombo, mercurio, cadmio, cromo esavalente, bifenili polibromurati (PBB) o etere di difenile polibromurato (PBDE).

Riscontrando la presenza di piombo nel modulo fotovoltaico sottoposto ad analisi, si può dedurre che questo sia stato prodotto precedentemente all'anno 2006. In particolare l'appartenenza di tale sostanza al modulo sottolinea ulteriormente la necessità di definire un processo di riciclaggio dei rifiuti fotovoltaici che consideri la presenza di materiali componenti differenti, e talvolta pericolosi, che come tali vanno trattati secondo procedure apposite.

Silicio

Si è successivamente proseguito con l'analisi dello strato di silicio policristallino, in particolare il campione mostra la parte di silicio rivolta verso il polimero posteriore. È stato possibile ottenere il campione grazie al bagno criogeno con il quale sono stati distaccati gli strati polimerici posteriori dallo strato di silicio e vetro anteriore. L'esame del campione al microscopio elettronico ha permesso di individuare due strati differenti, uno di silicio e uno di alluminio, come è mostrato negli spettri EDS (figura 6.8) corrispondenti alla figura 6.7.

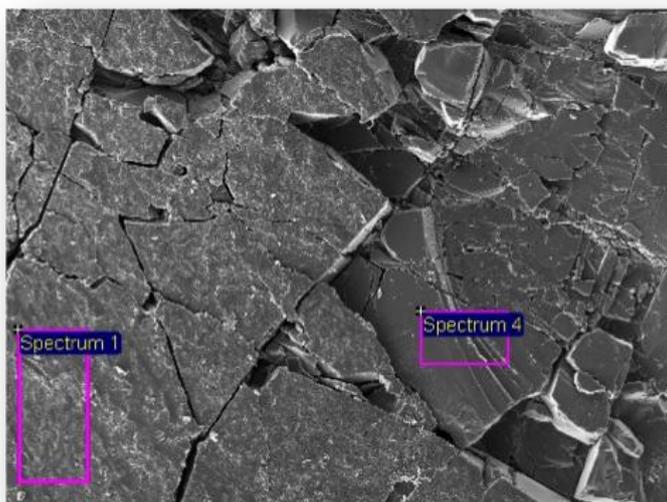


Figura 6.7: Immagine SEM del silicio parte posteriore del modulo policristallino

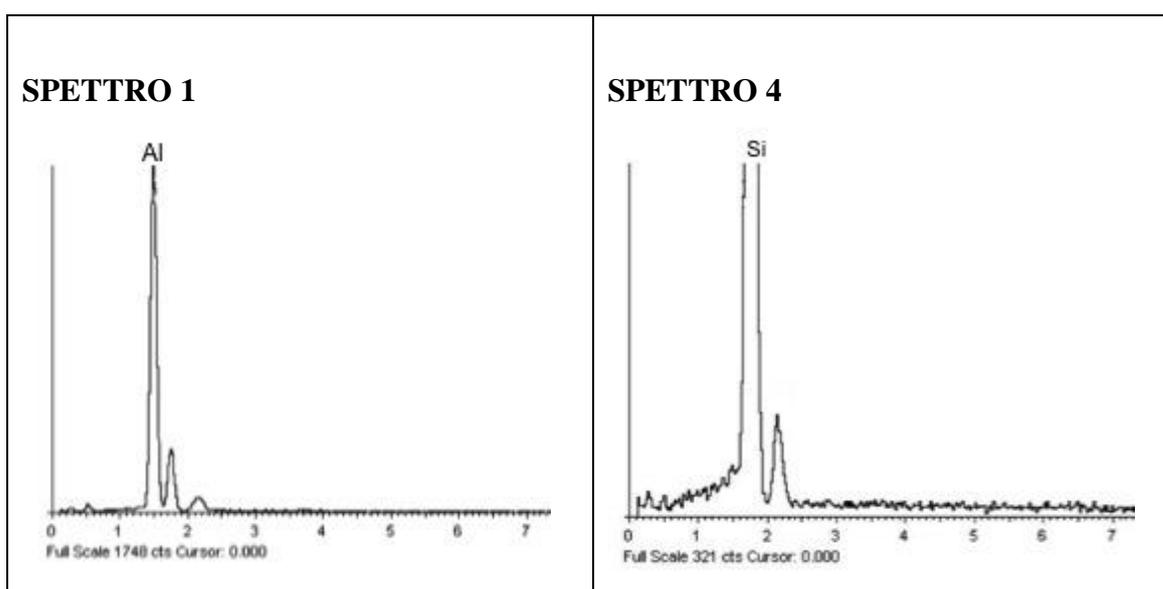


Figura 6.8 : Spettri EDS del campione del silicio parte posteriore

La presenza di uno strato di alluminio, oltre a quello in silicio, può essere correlato ad un incremento della capacità conduttiva del silicio stesso.

Vetro

Un'analisi EDS preliminare del vetro era già stata precedentemente effettuata sul campione della sezione della cella fotovoltaica. Ma uno studio più approfondito è stato eseguito utilizzando un campione costituito esclusivamente da vetro.

La figura 6.9 ottenuta al SEM mostra i classici piani di rottura di un vetro.

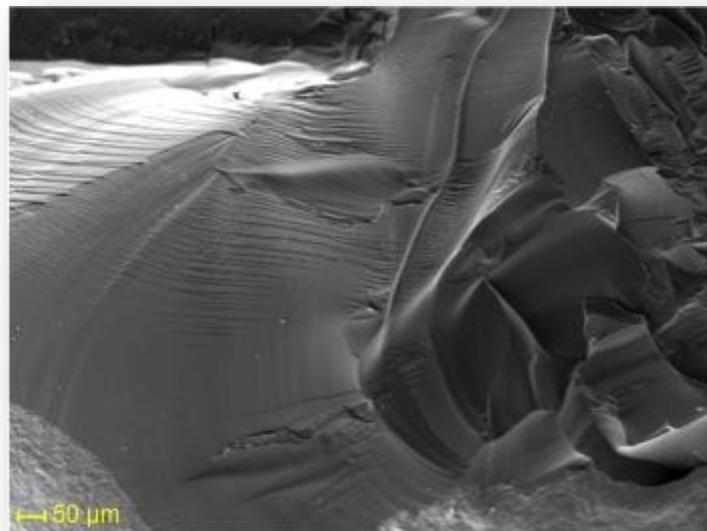


Figura 6.9: Immagine SEM del vetro del pannello policristallino

Inoltre, in riferimento allo strato vetroso è stato possibile valutare la sua composizione grazie all'analisi EDS del campione. In particolare la sua formulazione in ossidi è risultata essere la seguente:

Ossido	%peso
SiO ₂	74.931
Na ₂ O	10.309
CaO	10.199
MgO	3.370
Al ₂ O ₃	1.191

Tabella 6.5: Composizione percentuale in peso del vetro

La composizione può essere associata con una classica composizione di un vetro soda-lime.

Con vetro sodalime si intende un vetro che ha come formatore la silice e per renderlo più lavorabile sono aggiunti ossidi di calcio e sodio. In particolare la composizione tipica di un vetro sodalime è la seguente: 71-73% SiO₂, 12- 14% Na₂O, 10-12% CaO. Si nota come la composizione del vetro analizzato sia molto simile a quella del vetro comune o sodalime e l'aggiunta di MgO e Al₂O₃ contribuiscano rispettivamente a prevenire la devettrificazione e a migliorare la durabilità.

Il vetro comune è frequentemente utilizzato per la produzione di vetri per finestra, quindi esso viene normalmente riciclato nei tipici impianti di riciclaggio del vetro e riutilizzato valorizzandolo come materia prima seconda.

Concludendo, grazie all'analisi visiva e al microscopio elettronico, è stato possibile valutare la configurazione del pannello fotovoltaico policristallino nella sua totalità. Nella seguente figura si possono osservare i vari strati componenti il pannello policristallino analizzato:



Figura 6.10: Complesso del pannello policristallino

6.3.2. Pannello Monocristallino

La stessa procedura utilizzata per l'analisi del pannello policristallino, è stata applicata per il pannello monocristallino. Anche in questo caso, si sono studiati diversi campioni:

- Sezione
- Conduttore
- Silicio

Nel seguito sono riportati i risultati dei campioni analizzati.

Sezione

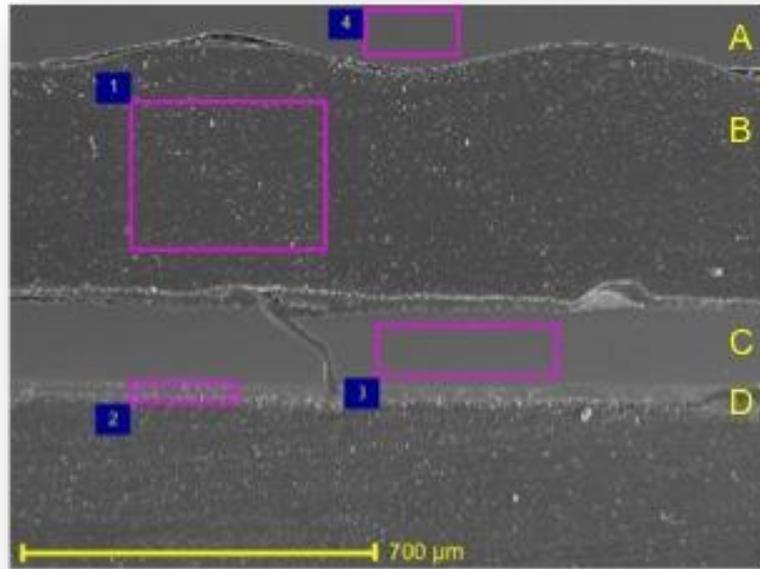


Figura 6.11 : Immagine SEM della sezione del pannello monocristallino

La micrografia in figura 6.11 mostra chiaramente come il pannello sia costituito da più strati sovrapposti i quali, nel loro insieme, ne permettono il funzionamento.

Partendo dall'alto dell'immagine, osserviamo che il layer denominato A è costituito da fase vetrosa come confermato dallo spettro 4 riportato in figura 6.12. Grazie all'analisi EDS è stato possibile valutare in linea di massima la composizione del vetro, e nel seguito si riporta la composizione in ossidi della fase amorfa.

Ossido	%peso
SiO ₂	75.567
Na ₂ O	10.442
CaO	10.839
MgO	1.765
Al ₂ O ₃	1.387

Tabella 6.6 : Composizione percentuale in peso del vetro

La formulazione ottenuta dalla rielaborazione dei dati da EDS, è associabile a quella di un vetro soda lime, come si è osservato anche per il pannello policristallino.

Proseguendo nell'osservazione dell'immagine SEM in figura 6.11 troviamo lo strato denominato B che, come è evidenziato dallo spettro 1 in figura 6.12, è costituito da carbonio e ossigeno, che possono essere relazionati ad una struttura polimerica.

Gli strati successivi, C e D, sono composti rispettivamente da silicio e alluminio. Lo strato di alluminio funge da contatto posteriore, come è usuale incontrare in molte tipologie di pannelli.

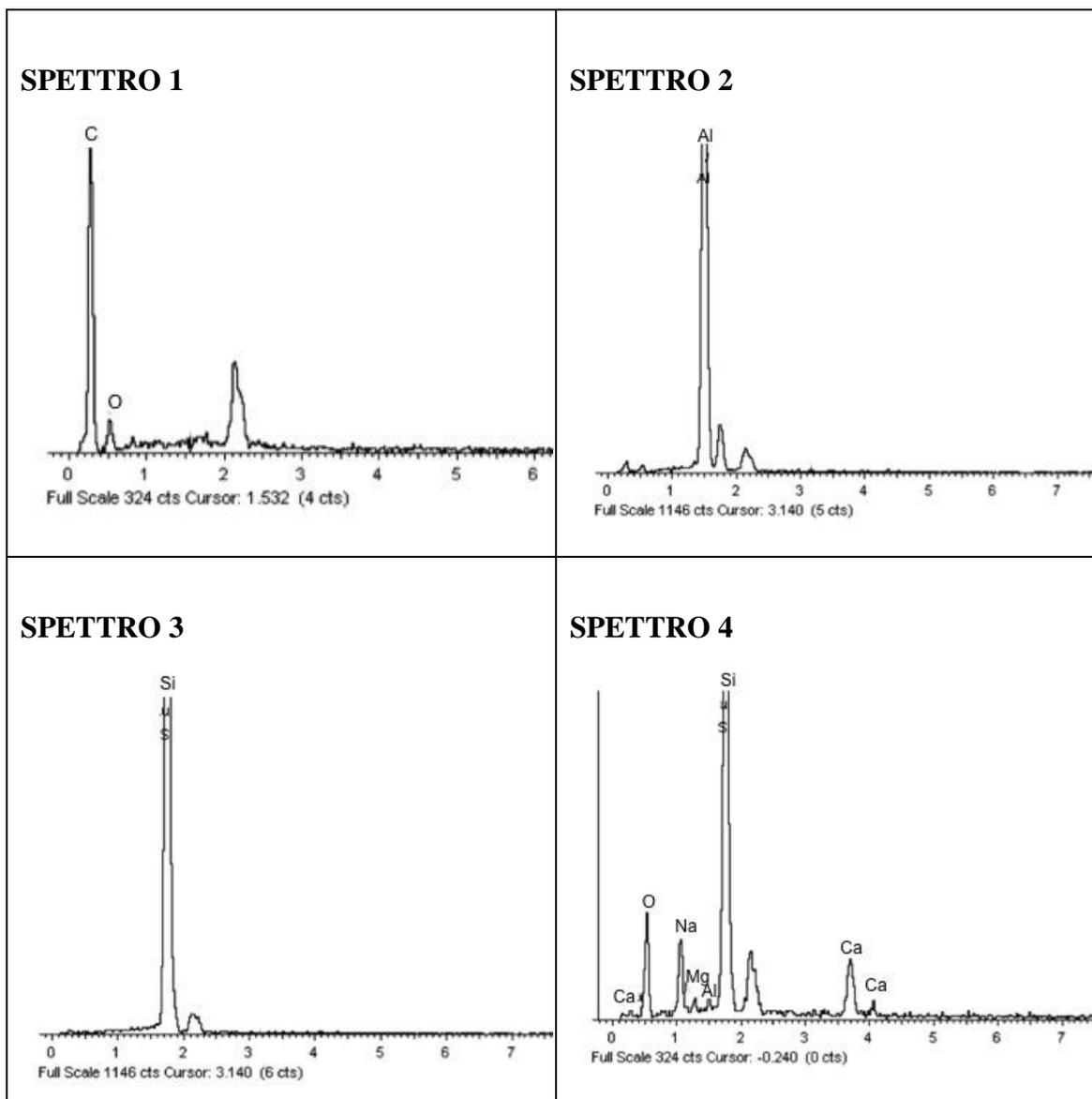


Figura 6.12 : Spettri EDS del campione della sezione

Conduttore

Come per il policristallino, il pannello monocristallino presenta fibre di lega metallica tra il vetro e lo strato di silicio che fungono da conduttori. Per poter valutare la composizione di questa lega si sono svolte diverse analisi EDS su varie aree del campione, e si è potuto così definire la composizione media:

	Sn (%peso)	Pb (%peso)
Media	57.07	42.93
Dev.St	4.09	4.09
Min	49.86	35.11
Max	64.89	50.14

Tabella 6.7 : Composizione quasi eutettica

Come si osserva nella tabella riassuntiva 6.7 la composizione è del 57% e del 43% in peso di stagno e piombo rispettivamente. Questa formulazione è una composizione comparabile con quell'eutettica (60Sn-40Pb, detta quasi eutettica) che è normalmente utilizzata nell'industria elettronica, ma il cui utilizzo deve sottostare ai vincoli imposti dalla normativa europea RoHs.

Silicio

Da un'analisi visiva del campione di silicio si nota come la superficie di esso sia percorsa da filamenti costituiti da altro materiale. Dalla micrografia riportata in seguito, si nota in maniera precisa la presenza della traccia.

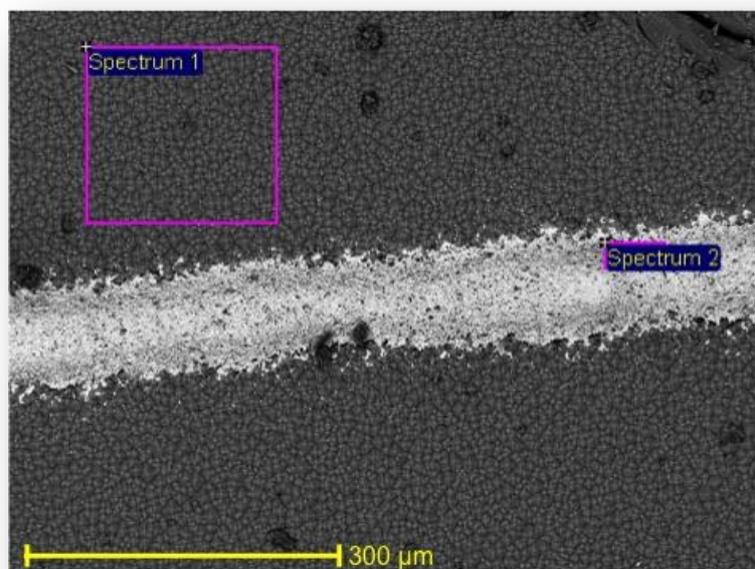


Figura 6.13 : Micrografia del silicio ottenuta con elettroni retrodiffusi

Le analisi EDS delle due fasi mostrano come le tracce, presenti sul substrato di silicio, siano di argento che fungerà da contatto superiore.

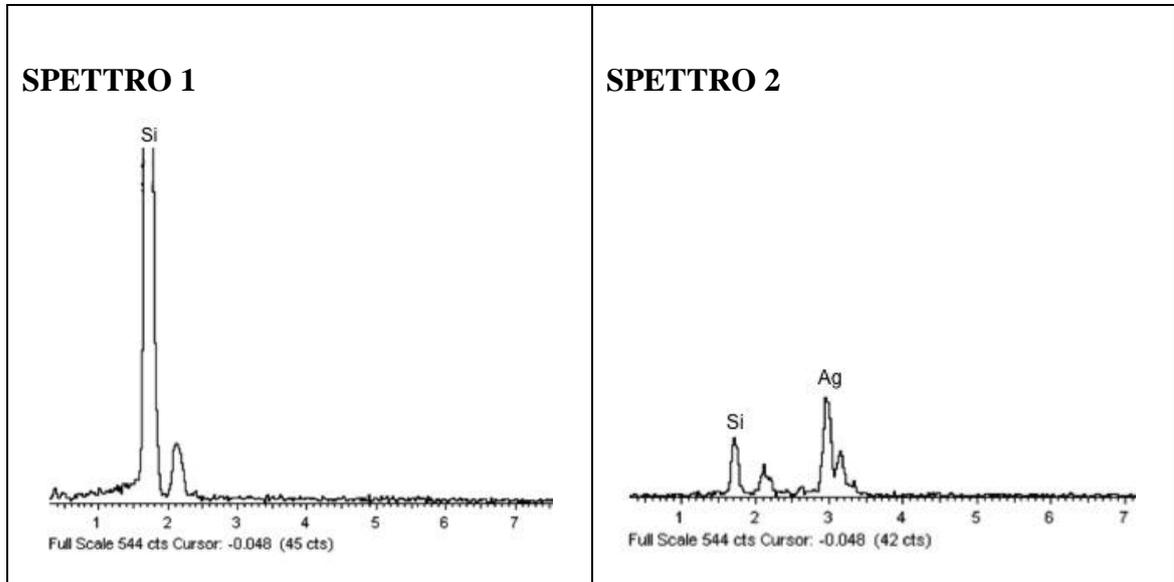


Figura 6.14 : Spettri EDS del campione di silicio e argento

Concludendo, come per il pannello policristallino, grazie all'analisi visiva e al microscopio elettronico, è stato possibile definire la configurazione del pannello fotovoltaico monocristallino nella sua totalità. Nella seguente figura si possono osservare i vari strati componenti il pannello monocristallino analizzato:



Figura 6.15: Complesso del pannello monocristallino

La successione degli strati dei materiali costituenti risulta essere lo stesso sia per il pannello policristallino che per quello monocristallino, con l'unica differenza che in quest'ultimo si evidenzia la presenza di filamenti d'argento.

6.3.3. Pannello in silicio Amorfo

Per il pannello in silicio amorfo è stato analizzato un unico campione, quello relativo alla sezione del wafer fotovoltaico che risulta essere il campione più significativo.

Il pannello con silicio amorfo ha una configurazione diversa rispetto agli altri due moduli studiati. Infatti lo strato di silicio è direttamente depositato sul vetro e non unito ad esso tramite uno strato polimerico, tale affermazione può essere fatta grazie alle analisi effettuate

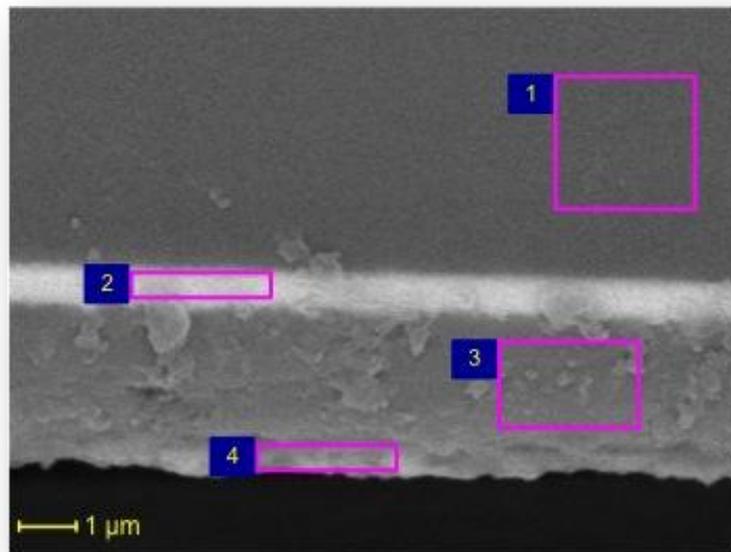


Figura 6.16 : Micrografia della sezione ottenuta con elettroni retrodiffusi

In particolare si nota, dall'analisi con elettroni retrodiffusi, come al di sotto del vetro non vi sia stato depositato solo uno strato, ma sia presente una struttura a sandwich. Il silicio è racchiuso tra pellicole trasparenti conduttive, che permettono il passaggio della luce fino al silicio stesso, che viene così attivato, esse fungono da contatto ohmico per il passaggio di energia nel pannello.

Grazie all'analisi EDS (figura 6.17 e 6.18) è stato possibile valutare che, nel caso specifico di questo pannello, la pellicola conduttiva a contatto con il vetro contiene silicio e stagno, mentre quella sottostante al silicio è costituito da ossido di zinco drogato con argento.

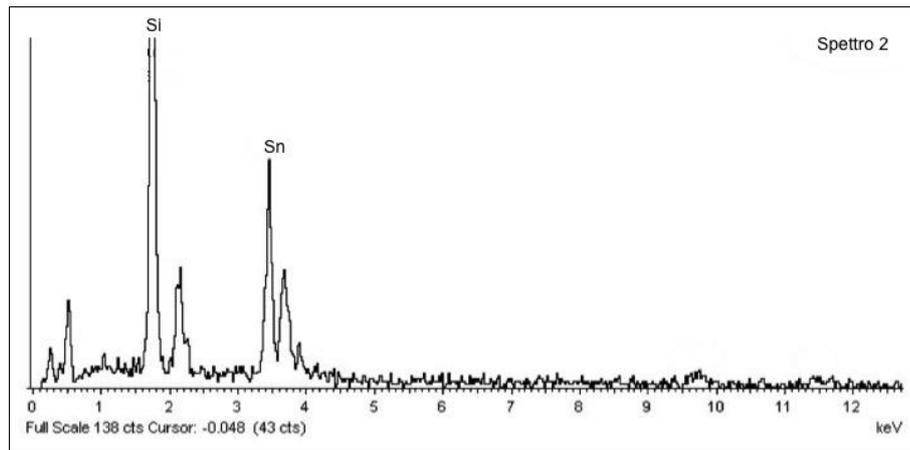


Figura 6.17: Spettro 2 dell'EDS del campione della sezione del pannello in silicio amorfo

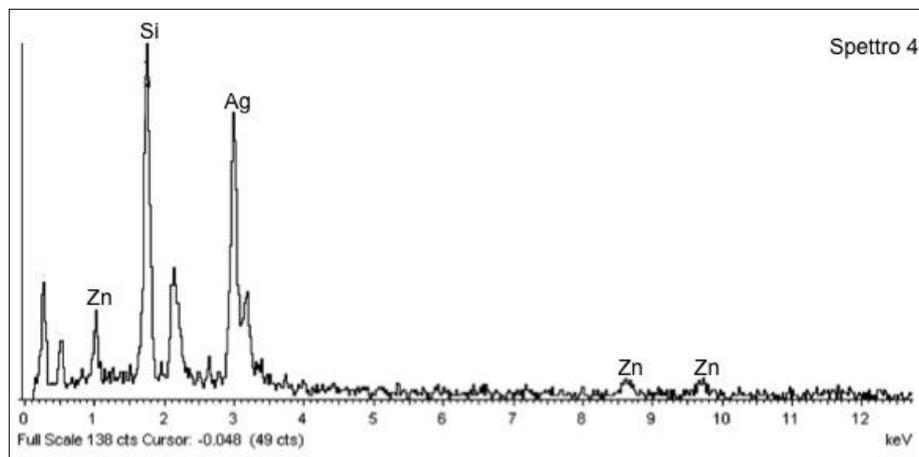


Figura 6.18: Spettro 4 dell'EDS del campione della sezione del pannello in silicio amorfo

Lo strato di silicio compreso tra le due pellicole conduttive non è puro, ma sono presenti sia lo stagno che lo zinco derivanti dagli altri strati, come si può osservare nello spettro 3. Quindi, si può supporre che il passaggio tra questi tre strati non è discontinuo ma graduale lungo lo spessore.

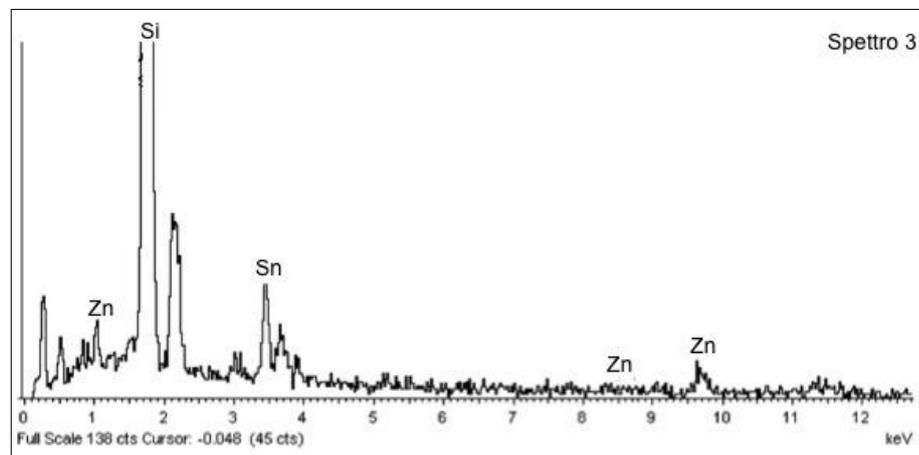


Figura 6.19: Spettro 3 dell'EDS del campione della sezione del pannello in silicio amorfo

Anche in questo caso il vetro ha una composizione da soda lime, molto simile a quella osservata per gli altri pannelli, come si osserva nella tabella sottostante.

Ossido	%peso
SiO ₂	74.931
Na ₂ O	10.309
CaO	10.199
MgO	3.370
Al ₂ O ₃	1.191

Tabella 6.8: Composizione percentuale in peso del vetro

Concludendo, la configurazione del pannello di silicio amorfo può essere schematizzata come segue:

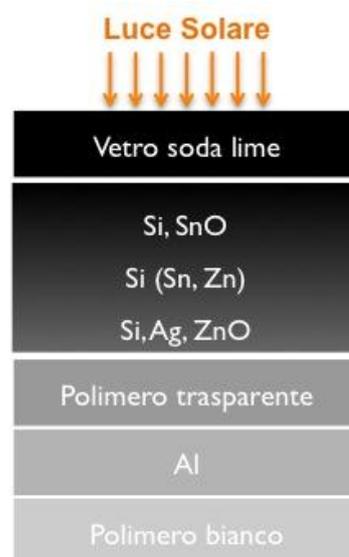


Figura 6.20: complesso del pannello in silicio amorfo

6.3.4. Osservazioni sui risultati delle analisi

Dai risultati ottenuti delle analisi effettuate durante la fase sperimentale della tesi è stato possibile definire quali siano i materiali costituenti le tre tipologie di pannelli fotovoltaici: monocristallino, policristallino e in silicio amorfo.

Interessante osservazione, soprattutto in un'ottica di recupero dei rifiuti fotovoltaici, è la presenza di una lega di piombo e stagno. Le procedure di riciclo dei pannelli dovranno

contemplare la presenza di materiali diversi a seconda del pannello fotovoltaico trattato, ma in particolare per i moduli prodotti prima dell'introduzione della normativa RoHS potrebbe essere necessario definire procedure di riciclo specifiche per il trattamento di materiali pericolosi, come il piombo.

Ulteriore considerazione riguarda il vetro utilizzato per la realizzazione dei pannelli fotovoltaici che risulta essere il materiale costituente i moduli presente in maggior quantità (più del 50% del peso di un pannello). Esso è un vetro di tipo sodalime, con una composizione simile per tutte le tipologie di pannelli analizzati nello studio. Essendo il vetro sodalime un vetro comune, dopo essere stato separato dagli altri materiali costituenti i pannelli, può essere riciclato negli appositi impianti attualmente utilizzati per il riciclo del vetro, ed essere così nuovamente valorizzato come materia prima seconda.

7. MATERIALE COMPONENTE

Dopo aver definito sperimentalmente la microstruttura dei pannelli fotovoltaici cristallini e in silicio amorfo risulta interessante effettuare un'ulteriore analisi che permetta di evidenziare le quantità di ogni materiale componente presente in un modulo, considerando che ogni tipologia di dispositivo ha le proprie caratteristiche.

Un'analisi più precisa scaturirebbe dallo studio di tutte le tipologie di pannello presenti sul mercato suddivise per ogni azienda produttrice, ma in questo lavoro preliminare l'intento è quello di analizzare il problema considerando una media delle caratteristiche dei moduli esistenti. Un approccio di maggior dettaglio sarà oggetto di raffinamenti futuri di tale studio.

Pur non analizzando ogni singolo pannello derivante dalle varie aziende si effettua un'analisi comparativa tra i moduli cristallini e i moduli in silicio amorfo. In particolare la trattazione si riferisce a pannelli fotovoltaici ideali le cui caratteristiche rappresentino al meglio i pannelli ad oggi esistenti.

I pannelli policristallini e i pannelli monocristallini, fin qui trattati in modo separato, verranno nel seguito raggruppati in un'unica categoria e chiamati semplicemente moduli cristallini, in quanto, come si è potuto dedurre dall'analisi micro strutturale, essi presentano gli stessi materiali costituenti.

7.1 Materiali componenti dei moduli cristallini

I materiali che compongono i moduli cristallini sono i seguenti:

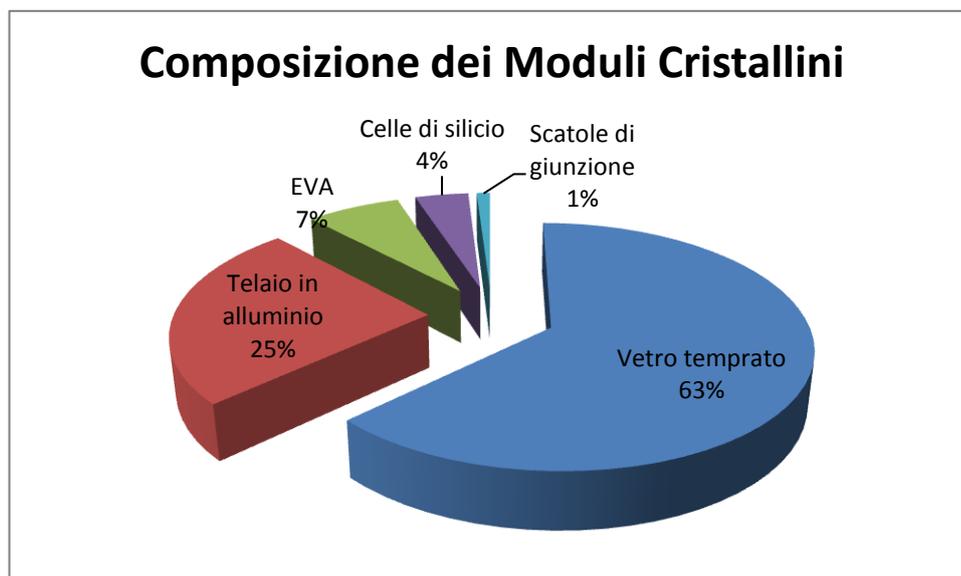


Figura 7.1: Composizione moduli cristallini

Dal grafico in figura 7.1 si nota come i materiali principali che costituiscono un modulo cristallino sono il vetro temprato, l'alluminio con cui è realizzato il telaio e l'EVA.

Le celle in silicio occupano solo il 4% del peso totale del modulo, in particolare il silicio monocristallino è presente nei rispettivi pannelli in una percentuale dello 0,6%, mentre il silicio policristallino concorre al peso totale del modulo con una percentuale del 0,8%. Il silicio policristallino nelle celle fotovoltaiche è presente in maggior quantità rispetto a quanto accade nelle celle monocristalline, perché esso in forma policristallina risulta essere più fragile ed esige uno spessore superiore. Considerando la classe dei pannelli cristallini, possiamo effettuare una semplificazione, in modo coerente alla trattazione effettuata fino ad ora, ed affermare che in essi la percentuale di silicio rispetto al peso totale del dispositivo ammonta a 0,7%.

Si può effettuare un paragone tra la percentuale di vetro sottolineata in questa fase con la percentuale di vetro ricavata dall'analisi sperimentale effettuata sui moduli cristallini. In particolare dalla determinazione sperimentale della densità del vetro, eseguita tramite il picnometro a elio, è stato possibile calcolare la quantità di vetro presente nei moduli policristallino e monocristallino. La percentuale in peso del vetro rispetto al peso totale del pannello è risultata essere rispettivamente del 70,01% e del 62,63%. Si può, quindi, notare come tali percentuali calcolate in modo sperimentale non si discostino molto dalla percentuale di vetro pari al 63% evidenziata dal grafico in figura 7.1.

7.2 Materiali componenti dei moduli in silicio amorfo

Considerando un modulo fittizio che rappresenta le caratteristiche medie di un modulo fotovoltaico in silicio amorfo, vengono evidenziate le seguenti quantità di materiale:

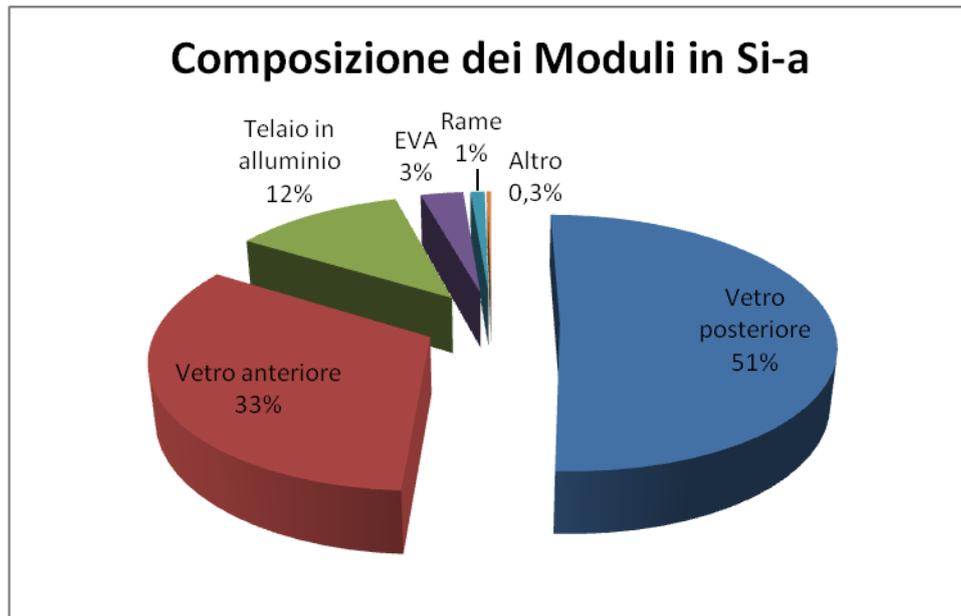


Figura 7.2 : Composizione moduli in silicio amorfo

Come per i moduli cristallini, anche per i moduli in silicio amorfo, il materiale preponderante in ogni pannello è il vetro temprato, che in questo caso si differenzia tra vetro anteriore (33%) e vetro posteriore (51%). Risulta evidente che una parte preponderante del peso del modulo spetta al telaio in alluminio.

Dal confronto delle percentuali di materiali componenti il modulo cristallino e il modulo in silicio amorfo si evince che la percentuale di Alluminio e di EVA diminuisce nel modulo in Si-a, mentre in quest'ultimo aumenta la percentuale di vetro.

Nei moduli in silicio amorfo si osserva la presenza di un materiale prezioso: il rame, anche se in quantità minime.

Nella voce "Altro" del grafo a cui corrisponde uno 0,3%, sono comprese varie sostanze in percentuali minime. Le sostanze e le relative percentuali sono le seguenti:

Materiale	%
Altro	0,3%
Stagno	0,12%
Piombo	0,10%
Selenio	0,03%
Indio	0,02%
Gallio	0,01%
Silicio	0,01%

Tabella 7.1: Elenco della voce "Altro" nei materiali costituenti

Tra i materiali costituenti, che sono presenti in minor percentuale, risulta necessario evidenziare la presenza del piombo. Il piombo è un metallo pesante, tenero e malleabile che sia puro, sia in forma di composti risulta essere nocivo per la salute umana, sarà quindi necessario tenere in considerazione la sua presenza in fase di riciclaggio dei materiali provenienti da rifiuti fotovoltaici.

Come per i pannelli cristallini, anche in questo caso, è possibile effettuare un confronto tra la percentuale in peso del vetro definito in questa analisi e la percentuale in peso del vetro determinata nella fase sperimentale dello studio. Una considerazione preliminare è necessaria, in quanto il pannello in silicio amorfo disponibile per le prove di laboratorio non presenta alcun vetro posteriore, ma il retro di esso è costituito da polimero, quindi il confronto è da effettuare tra la percentuale di vetro anteriore pari al 33% presentato dal grafico in figura 7.2 con la percentuale di vetro determinata sperimentalmente pari al 67%. In questo caso, contrariamente a quanto detto per i moduli cristallini, la differenza tra le percentuali di vetro è sostanziale e ciò è probabilmente dovuto alle diverse caratteristiche dei moduli in silicio amorfo trattati.

7.4 Quantità di materiale presente dei pannelli fotovoltaici installati

Considerando la potenza totale installata, ad oggi, ed assumendo la vita utile dei moduli di circa 25 anni, risulta naturale chiedersi quale sarà l'entità di componenti e di materiali con i quali avremo a che fare in fase di dismissione dei sistemi fotovoltaici.

Per effettuare tale stima si considerano i dati relativi sia alla potenza installata che alla composizione delle tipologie di moduli rilevati nelle fasi precedenti dell'analisi.

Semplificando estremamente la trattazione e considerando come unica tipologia di pannelli fotovoltaici installati quelli in silicio cristallino, si nota che fra 25 anni in Italia e nel mondo saranno da gestire le seguenti quantità di materiale:

Moduli cristallini			
Materiale componente un pannello fotovoltaico	Percentuale	Q.tà Italia [ton]	Q.tà Mondo [ton]
Vetro temprato	63%	700.560	22.478.400
Telaio in alluminio	25%	278.000	8.920.000
EVA	7%	77.840	2.497.600
Celle di silicio	4%	44.480	1.427.200
Scatole di giunzione	1%	11.120	356.800
Totale peso		1.112.000	35.680.000

Tabella 7.2: Materiale costituente i pannelli cristallini

Assumendo che i pannelli installati non sono solo cristallini, ma anche in film sottile, in silicio amorfo, in telluro di cadmi e in materiale organico, le quantità e tipologie di materiale da avviare a recupero nel futuro prossimo cambiano notevolmente.

La tesi, però, tratta esclusivamente i pannelli cristallini e i pannelli in silicio amorfo, in quanto questi sono i più diffusi. Uno studio più approfondito che consideri tutte le tipologie di pannelli fotovoltaici verrà svolto in futuro.

Considerando sia ai pannelli cristallini che quelli in silicio amorfo, che sono costituiti da materiali diversi sia per quantità che per tipologia, è necessario approfondire maggiormente i calcoli eseguiti in tabella 7.2. Quindi per conoscere quale sarà la quantità di materiale fotovoltaico da avviare a recupero nei prossimi anni è utile effettuare una valutazione preventiva che in successione evidenzia, per ogni tipologia di pannello:

1. la potenza installata,
2. il numero di pannelli installati,
3. il peso dei moduli,
4. il peso dei materiali componenti ogni tipologia di pannelli,
5. quantità totale di materiale componente.

Tale valutazione consta in alcuni specifici calcoli matematici svolti sui dati di cui si è già a conoscenza.

1° passaggio

Conoscendo le percentuali delle varie tipologie di pannelli installati in Italia e nel Mondo, si possono attribuire le quote relative della potenza installata.

Nella successiva tabella sono calcolati i kW relativi alle tre tipologie di pannelli prese in analisi:

		Italia	Mondo
Potenza totale installata		12.500.000	40.000.000
Moduli cristallini	%	91%	84%
	Potenza [kW]	11.375.000	33.600.000
Moduli in silicio amorfo	%	8%	10%
	Potenza [kW]	1.000.000	4.000.000

Tabella 7.3: Potenza istallata

Come già detto la maggiore quantità e potenza di moduli installati è di tipo cristallino, che risulta essere di circa 11.375.000 kW per l'Italia e 33.600.000 kW nel mondo.

2° passaggio

È possibile calcolare il numero di pannelli installati in funzione di ogni tipologia di questi attraverso il rapporto tra la potenza totale installata per ogni tipologia e la potenza nominale del singolo pannello. Mantenendo le ipotesi fatte nei capitoli precedenti, consideriamo come potenza nominale del pannello 16 kW.

	Italia	Mondo
Ipotesi		
Potenza nominale di 1 pannello (kW)	0,18	
Risultati		
Numero moduli cristallini	63.195.000	186.700.000
Numero pannelli amorfi	5.556.000	22.000.000

Tabella 7.4 : Numero di pannelli fotovoltaici istallati

3° passaggio

Considerando, per ipotesi che un pannello abbia un peso di 16kg, è possibile definire il peso totale dei pannelli installati in funzione delle varie tipologie.

Tale ipotesi di peso sottende una approssimazione importante, in quanto i moduli in silicio amorfo possono presentare due stati di vetro, uno anteriore e uno posteriore, oppure uno strato di vetro anteriore e uno strato di polimero sul retro. La differente configurazione comporta pesi dei pannelli sostanzialmente diversi. Ma per coerenza si mantengono valide le ipotesi fatte fino ad ora.

Quindi i pesi delle varie tipologie di pannelli installati risultano essere:

	Italia	Mondo
Ipotesi		
Peso di 1 pannello [kg]	16	
Risultati		
Peso dei moduli cristallini [ton]	10.111.200	29.872.000
Peso dei moduli in silicio amorfo [ton]	888.960	3.520.000

Tabella 7.5: Pesi dei pannelli fotovoltaici installati

4° passaggio

In questo passaggio vengono calcolate, considerando la composizione percentuale delle varie tipologie di materiali, le tonnellate di ogni materiale che costituiscono la totalità degli impianti fotovoltaici installati in Italia e nel Mondo.

Si ricorda che in tabella la voce “altro”, comprende i materiali di minori percentuali, che comunque vengono sotto elencate con le corrispondenti percentuali.

Materiale componente pannello fotovoltaico	Percentuale di materiale	Quantità Italia [ton]	Quantità nel mondo [ton]
Moduli cristallini			
Vetro temprato	63%	6.370.056	18.819.360
Telaio in alluminio	25%	2.527.800	7.468.000
EVA	7%	707.784	2.091.040
Celle di silicio	4%	404.448	1.194.880
Scatole di giunzione	1%	101.112	298.720
Moduli in silicio amorfo			
Vetro posteriore	50,80%	451.592	1.788.160
Vetro anteriore	32,90%	292.468	1.158.080
Telaio in alluminio	11,90%	105.786	418.880
EVA	3%	26.669	105.600
Rame + isolanti (cablaggi)	1%	8.890	35.200
Altro	0,30%	2.667	10.560
Stagno	0,12%	1.067	4.224
Piombo	0,10%	889	3.520
Selenio	0,03%	267	1.056
Indio	0,02%	178	704
Gallio	0,01%	89	352
Silicio	0,01%	89	352

Tabella 7.6: Pesi dei materiali costituenti i pannelli fotovoltaici classificati per tipologia

5° passaggio

Considerando che i materiali componenti, presenti in maggiore quantità, e comuni a tutte le tipologie di pannelli fotovoltaici, risulta interessante aggregare le quantità per evidenziarne il quantitativo complessivo con cui sarà necessario confrontarsi al termine della vita utile degli attuali impianti fotovoltaici.

Tale quantitativo complessivo potrà, inoltre, essere valorizzato in termini monetari.

Materiale componente pannello fotovoltaico	Quantità in Italia [ton]	Quantità nel mondo [ton]
Vetro temprato	7.114.116	21.765.600
Alluminio	2.633.586	7.886.880
EVA	734.453	2.196.640
Silicio	7.873	250.112

Tabella 7.7: Principali materiali componenti i pannelli fotovoltaici installati

Tra 25 anni circa l'eventuale dismissione degli impianti fotovoltaici attualmente installati nel mondo produrranno più di 22.000.000 di tonnellate di vetro, circa 8.000.000 tonnellate di alluminio e poco più di 2.000.000 tonnellate di EVA. La quantità di silicio da smaltire, o nel caso migliore che si potrà riutilizzare, ammonta a poco più di 250.000 di tonnellate.

Gli impianti installati attualmente in Italia daranno un notevole contributo all'ammontare totale di materiali. Questi nello specifico ammontano a poco meno di 7.000.000 tonnellate di vetro temprato, 2.500.000 tonnellate di alluminio costituente i telai dei moduli, poco più di 700.000 tonnellate di EVA e quasi 8.000 tonnellate di silicio.

La totalità di questi materiali dovranno essere gestiti e magari riciclati nella loro completezza nei prossimi 25-30 anni.

7.4. Valorizzazione dei materiali

La gestione dei pannelli al termine della loro vita utile è strettamente correlata alla gestione dei materiali derivanti dal processo di disassemblaggio delle varie tipologie di pannelli.

In questo ambito risulta estremamente importante valorizzare i materiali che si possono ottenere dal riciclaggio dai dispositivi fotovoltaici.

Considerando il prezzo (€/kg) attuale dei materiali componenti, ma soprattutto considerando il valore di tali prezzi fra 25 anni, è possibile stimare quale sarà il valore totale dei materiali dati i quantitativi futuri calcolati nel paragrafo precedente per l'Italia e per il mondo.

Materiale componente pannello fotovoltaico	Prezzo attuale [€/ton]	Valore materiali derivanti da moduli installati in Italia [€]	Valore materiali derivanti da moduli installati nel mondo [€]
Vetro temprato	50	355.705.776	1.088.280.000
Alluminio	600	1.580.151.744	4.732.128.000
EVA	100	73.445.280	219.664.000
Silicio	30.000	236.186.880	7.503.360.000

Tabella 7.8: Valorizzazione dei principali materiali costituenti i pannelli fotovoltaici

Il valore dei materiali che potrebbero essere recuperati dal riciclaggio dei pannelli fotovoltaici attualmente installati è rilevante, e ad esso è strettamente correlato il mancato costo di estrazione e produzione di materie prime non derivanti da riciclo.

Si nota come il vetro pur avendo il prezzo inferiore risulta essere un materiale che concorre in buona parte all'ammontare del valore totale dei materiali recuperabili, in quanto esso, come già detto, costituisce la maggior parte dei dispositivi fotovoltaici. L'alluminio, anch'esso presente in elevate quantità all'interno di un pannello fotovoltaico, attualmente ha un elevato valore economico sul mercato, e quindi è bene recuperarlo e rivalorizzarlo come materia prima seconda.

Il silicio, invece, pur presentandosi in percentuale minima nelle celle fotovoltaiche, occupa una porzione consistente del valore di recupero dei materiali, in quanto il suo prezzo a tonnellata è molto elevato. L'ottenimento di silicio nuovamente spendibile come materiale per la produzione di celle fotovoltaiche, richiede un processo molto complesso e dispendioso in termini di energia, quindi è necessario valutare bene il trade off tra il valore del materiale recuperato e i costi sostenuti per il processo di riciclaggio. È bene sottolineare che il prezzo indicato del silicio, è quello relativo al silicio di grado solare, quindi tipico per la produzione delle celle fotovoltaiche.

Oltre ai materiali principali, indicati in tabella 7.8, è bene ricordare che nei pannelli sono presenti, anche se in minime quantità, altri due metalli di valore: rame e argento.

I risultati forniti da questo capitolo permettono di ricavare il valore economico, se pur approssimato, dei materiali recuperabili da un processo di riciclaggio dei dispositivi fotovoltaici attualmente installati.

Il corretto recupero e riciclaggio di essi al termine della loro vita utile può portare ad un ricavo economico insito nel riutilizzo dei materiali costituenti i moduli come materie prime seconde da reintrodurre nel mercato.

8. DESTINAZIONE DEI RIFIUTI FOTOVOLTAICI

Nella società attuale è necessario osservare i rifiuti in un'ottica diversa da quella usata fino ad oggi: il rifiuto non è più da considerarsi come ciò che non può essere utilizzato e quindi non ha più alcun valore. Risulta, contrariamente, necessario valorizzare il rifiuto e processarlo in modo tale che i suoi materiali costituenti possano essere riciclati e quindi riutilizzati nella produzione di un nuovo prodotto.

Affinché tale processo possa aver luogo è opportuno attuare una corretta gestione della filiera che si occupi di raccogliere, centralizzare e indirizzare i rifiuti verso l'apposito impianto di riciclaggio.

I pannelli fotovoltaici sono dispositivi nati da pochi anni e, in quanto tali, la definizione del loro processo di recupero e riciclaggio che li vede protagonisti come rifiuti è ancora agli albori.

Il problema della gestione di questi rifiuti, però, si presenterà nel prossimo futuro e, come è stato evidenziato nei precedenti capitoli, coinvolgerà un ingente entità di materiali diversi da trattare.

Quindi è bene prepararsi in anticipo in modo da riuscire ad affrontare il problema in un'ottica di economicità e rispetto dell'ambiente.

8.1. Possibili alternative di gestione dei rifiuti fotovoltaici

8.1.1. Smaltimento in discarica

Tutt'ora i rifiuti di dispositivi fotovoltaici sono classificati come Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE) e sono destinati alla discarica sotto la denominazione di "rifiuti speciali non pericolosi". Contrariamente ad alcuni dispositivi RAEE, smaltiti in discarica per mancanza di un apposito impianto per il loro riciclaggio, i pannelli fotovoltaici sono costituiti principalmente da materiale inerte che non pone alcun problema di inquinamento. I materiali nocivi contenuti in una cella fotovoltaica, come è stato precedentemente constatato, sono presenti in quantità molto limitate e alcuni di essi, come il piombo, non sarà più possibile utilizzarli nella produzione del dispositivo perché vincolati da normative europee.

La soluzione adottata fino a pochi anni fa' e sultuariamente ancora in uso oggi, secondo la quale i rifiuti fotovoltaici sono smaltiti in discarica, sembra essere la più ovvia e semplice. Inoltre, ad una prima superficiale osservazione, tale destinazione di tali rifiuti

sembra essere anche la più economica. Infatti la realizzazione e il mantenimento in funzione di un impianto che permetta il riciclaggio dei pannelli fotovoltaici richiede un ingente investimento economico, risorse di cui la discarica apparentemente non necessita.

Analizzando in modo più approfondito la possibilità di smaltire i rifiuti fotovoltaici in discarica, si notano alcune evidenti note negative. Innanzi tutto, la discarica è un sistema complesso la cui realizzazione e mantenimento, durante e dopo 50 anni dalla sua chiusura definitiva, richiede elevate risorse economiche. Inoltre lo smaltimento indistinto dei rifiuti in discarica porta ad un mancato guadagno direttamente correlato al mancato riutilizzo di materiali riciclabili. Ciò è in particolar modo vero se si considerano i rifiuti fotovoltaici, infatti, come è stato evidenziato dai capitoli precedenti, circa il 90% dei materiali costituenti i suddetti dispositivi può essere riciclato, evitando l'estrazione di ulteriori materie prime per realizzare nuovi prodotti. Infine, nonostante ogni discarica venga realizzata a norma di legge, essa costituisce un forte elemento inquinante per l'ambiente e deturpante per il territorio.

Effettuate queste minime considerazioni risulta evidente la necessità di trovare una soluzione alternativa allo smaltimento in discarica dei rifiuti di materiale fotovoltaico.

8.1.2. PV CYCLE _ Consorzio europeo

Le numerose normative sui rifiuti introdotte in Europa negli ultimi anni esprimono un messaggio molto chiaro: «il produttore deve pagare» per i prodotti che immette sul mercato. Un'alternativa ragionevole a queste normative si trova spesso nell'adozione di misure volontarie di recupero e riutilizzo dei rifiuti alla fine del ciclo di vita dei prodotti.

La crescita esponenziale delle installazioni fotovoltaiche costringe i produttori a confrontarsi con i rischi che possono derivare da uno smaltimento non corretto dei moduli giunti a fine vita. Questa nuova consapevolezza viene espressa bene dalle parole di Karsten Ambach, presidente di PV Cycle: "L'industria fotovoltaica si impegna ad essere 'doppiamente verde', non solo fornendo energia pulita e rinnovabile per affrontare i cambiamenti climatici, ma anche garantendo che le odierne soluzioni ai cambiamenti climatici non costituiranno un problema di gestione dei rifiuti per le generazioni future". PV Cycle è un'associazione fondata nel Luglio 2007, i cui membri sono grandi produttori e distributori di pannelli fotovoltaici.

L'obiettivo dell'associazione è quello di avviare un programma volontario di raccolta e riciclo dei moduli da parte dell'industria fotovoltaica. Da notare che si tratta di un'iniziativa volontaria, i cui costi ricadranno interamente sui produttori, infatti i membri di PV Cycle accantonano ogni anno una somma che verrà poi utilizzata per le attività di recupero e riciclaggio dei moduli fotovoltaici.

La rete di recupero dei moduli fotovoltaici dismessi creata dall'associazione coinvolge una molteplicità di attori. La rete realizzata ha la seguente forma:

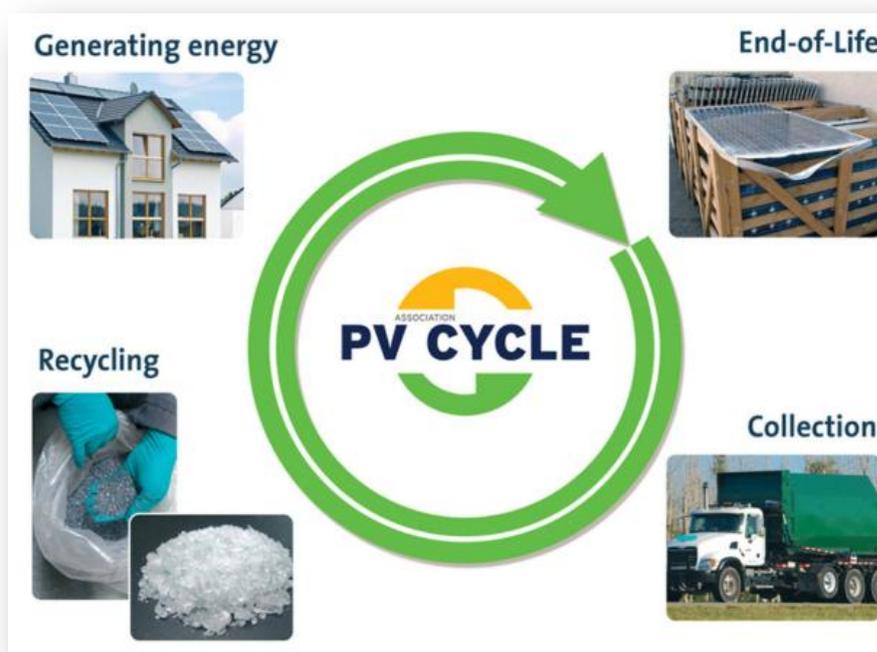


Figura 8.1: Filiera gestita da PV CYCLE

Al termine della vita utile, il recupero dei moduli - sia in silicio cristallino che a film sottile - avviene gratuitamente attraverso diversi punti di raccolta permanenti presso rivenditori e installatori, tramite container temporanei situati presso siti di costruzione, rinnovamento e demolizione di impianti e mediante una raccolta diretta da parte dell'associazione dei moduli che si trovano a una distanza superiore a 50 km dal punto di raccolta più vicino. Successivamente i moduli vengono destinati a impianti specifici per il recupero e il riciclo della materia prima, che viene per esempio utilizzata per la produzione di nuovi moduli fotovoltaici. A oggi, sul territorio europeo sono presenti complessivamente 183 punti di raccolta registrati (51 in Italia) e 77 certificati (15 in Italia). La tabella e il grafico seguenti mostrano come sono dislocati i punti di raccolta:

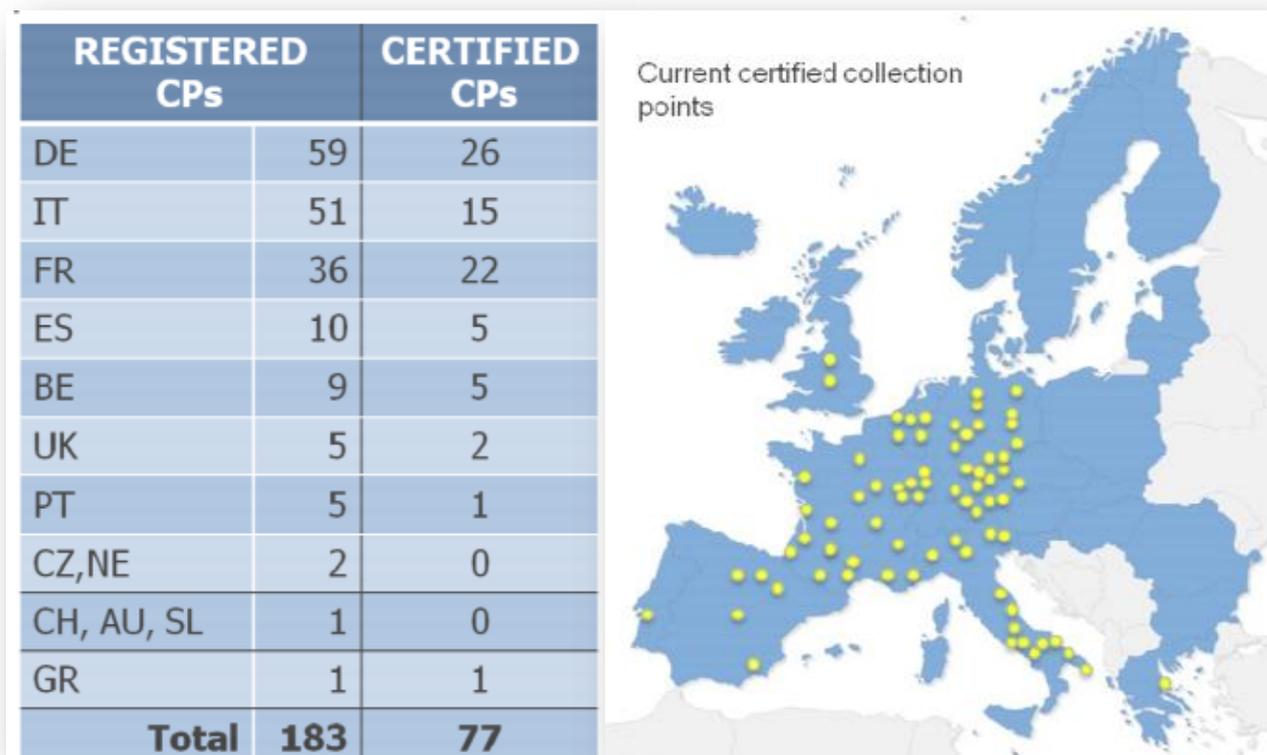


Figura 8.2 : Collection point europei di PV CYCLE

Chiunque sia in possesso di moduli fotovoltaici prodotti prima del 31 dicembre 2009 può richiederne la raccolta e il riciclaggio in qualsiasi momento, a costo zero. Invece per i moduli fotovoltaici prodotti dopo il 1 gennaio 2010 verranno accettati nei punti di raccolta solo se il produttore è un membro dell'associazione PV Cycle. PV Cycle fornisce i materiali di imballaggio necessari e si occupa dei servizi di trasporto e riciclaggio a titolo assolutamente gratuito, lasciando al proprietario la sola responsabilità dello smontaggio del sistema. Un'etichetta applicata sul pannello solare consentirà al proprietario dell'impianto di reperire con facilità tutte le informazioni necessarie per smaltire i moduli.

8.1.3. ECOLIGHT_ Consorzio italiano

Costituito nel 2004 dalla volontà di 43 aziende, il Consorzio Ecolight è oggi uno dei maggiori sistemi collettivi italiani che si occupa della raccolta e del trattamento di tutte le categorie di RAEE.

Nell'ottobre del 2011 Ecolight, in collaborazione con CSR Centro Servizi RAEE, ha attivato un sistema integrato di raccolta e recupero dei pannelli solari rotti o non più funzionanti. Una filiera tutta italiana che permette di raccogliere sull'intero territorio

nazionale i pannelli solari a fine vita e di riciclarli nel rispetto della legge e dell'ambiente. Il nuovo servizio presentato da Ecolight anticipa la normativa, in quanto secondo il Quarto Conto Energia obbliga i produttori di pannelli fotovoltaici a partecipare ad un consorzio di recupero e riciclo dei moduli inizia a partire dal 30 giugno 2012.



Figura 8.3: Logo di Ecolight

Ecolight è il primo consorzio italiano per la raccolta e il trattamento di RAEE che si occupi anche di rifiuti di materiale fotovoltaico, privilegiando il recupero delle materie prime seconde a contemplando lo smaltimento in discarica esclusivamente per le sostanze non riutilizzabili.

L'associazione PVCYCLE e il consorzio Ecolight sono i primi esempi concreti che dimostrano la presenza di significative alternative allo smaltimento dei pannelli fotovoltaici in discarica. Alternative da preferire per la salvaguardia dell'ambiente e per la possibilità che offrono di ottenere materie prime seconde da poter riutilizzare.

8.2 Processi di riciclaggio sul mercato

La gamma di tecnologie che rappresenta l'attuale mercato del prodotto fotovoltaico è sufficientemente ampia da richiedere una varietà di approcci per il riciclaggio e il recupero dei materiali.

Attualmente ci sono due processi nel mercato gestiti su scala reale:

il processo di trattamento di First Solar, usato per i moduli CdTe;

il processo di trattamento di Deutsche Solar, sfruttato principalmente per i moduli in silicio cristallino.

Processi per le altre tecnologie sono ancora in fase di sviluppo.

Nella tesi descriveremo esclusivamente il processo di riciclaggio della Deutsche Solar per coerenza con la trattazione fatta fino ad ora.

8.2.1. Deutsche Solar

La Solar Material è una business unit di Deutsche Solar e si occupa di riciclare i pannelli fotovoltaici, da cui ottengono materie prime seconde che possono essere riutilizzate.

Il processo di riciclaggio del modulo proprio della Deutsche Solar consente il recupero dei wafer dei moduli cristallini e il riciclaggio dei vetri e dei metalli.

La soluzione di riciclaggio di Deutsche Solar prevede due fasi principali: un trattamento termico e un trattamento chimico.

La diversità tra le tipologie di pannelli fotovoltaici cristallini dovute alle diverse caratteristiche tipiche delle aziende produttrici, non ha permesso di definire una procedura universale che sia in grado di effettuare il riciclaggio di qualsiasi dispositivo. Ciò fa' sì che non ci sia ancora una ricetta univoca né per il trattamento termico né per quello chimico, ma per ottenere il processo ottimale è necessario effettuare varie prove sul modulo da trattare.

Durante la prima fase termica, i moduli da riciclare vengono messi in un forno ad incenerimento, dove i componenti polimerici (EVA e Tedlar) bruciano a 600°C. A tale temperatura, il materiale incapsulante si decompone insieme alle altre sostanze polimeriche e così la tipica struttura a sandwich che caratterizza i moduli fotovoltaici si disassembla.

Grazie alla fase di trattamento termico il pannello fotovoltaico può essere separato nelle seguenti componenti:

- celle intatte;
- celle rotte;
- telaio in alluminio anodizzato;
- pannelli in vetro.

I metalli e il vetro così ottenuti vengono inviati alle loro specifiche filiere di riciclaggio. Le celle rotte verranno riciclate in un altro tipo di processo, mentre quelle intatte verranno sottoposte ad un ulteriore trattamento.

Affinché le celle fotovoltaiche possano essere riutilizzate in nuovi pannelli è necessario eliminare dalla superficie delle stesse: gli elettrodi metallici, gli strati di metallizzazione, il rivestimento antiriflesso (AR) e la giunzione pn. Per far ciò sono necessari bagni successivi in soluzione acide e basiche, che costituiscono la fase di trattamento chimico a cui le celle fotovoltaiche vengono sottoposte.

Il risultato dei due processi termico e chimico è una cella in silicio da poter essere riutilizzata in un nuovo pannello fotovoltaico.

Ciò garantisce un notevole risparmio energetico, dato che in questo modo si evita di dover produrre il wafer a partire dalla materia prima vergine. Inoltre, secondo uno studio di PV Cycle, i wafer così recuperati e quelli nuovi, una volta riprocessati in celle fotovoltaiche, sono di egual valore dal punto di vista delle caratteristiche elettroniche.

Concludendo si può affermare che il recupero dei pannelli fotovoltaici rotti o esausti grazie all'intervento di associazioni come PV Cycle o consorzi come Ecolight, portano al riciclaggio di questi con indubbi vantaggi dal punto di vista energetico, economico ed ambientale.

CONCLUSIONI

Preso atto dell'ingente diffusione delle installazioni fotovoltaiche degli ultimi anni e considerando la stima di circa 25-30 anni come vita utile di un pannello fotovoltaico, sorge logicamente il problema della gestione dei rifiuti fotovoltaici.

Nello studio effettuato si è dimostrato come i rifiuti fotovoltaici siano fonte di risorse valorizzabili, in particolare i materiali costituenti i pannelli esausti risultano essere facilmente riciclabili e valorizzabili sul mercato come materie prime seconde.

Una corretta gestione della filiera di recupero dei pannelli fotovoltaici giunti a fine vita che abbia come destinazione finale un impianto di riciclo dei moduli, permette di ottenere materiali di elevato valore economico, come vetro, alluminio, polimero e silicio, che in caso contrario sarebbero smaltiti in discarica con costi legati al mancato riutilizzo e mancato rispetto dell'ambiente e del territorio.

Soluzione migliore per affrontare il futuro problema dei rifiuti fotovoltaici oggi, risulta quello di aderire in misura volontaria all'associazione europea PV Cycle o contattare il consorzio italiano Ecolight, i quali si occuperanno di recuperare e centralizzare i pannelli fotovoltaici esausti per destinarli, poi, all'unico impianto di riciclaggio dei moduli cristallini attualmente esistente in Europa dell'azienda tedesca Deutsche Solar, che provvederà a separare i materiali costituenti e riversarli sul mercato come materie prime seconde.

In futuro sarà bene considerare la possibilità di realizzare anche in Italia un impianto che possa riciclare i pannelli fotovoltaici esausti, considerato il valore delle materie prime seconde che si possono recuperare dal processo. Nella realizzazione di tale processo è necessario valutare attentamente il trade off tra il valore dei materiali recuperabili e i costi legati alla realizzazione e al funzionamento dell'impianto stesso.

BIBLIOGRAFIA

- <http://europa.eu>
- <http://www.energie-rinnovabili.net> : portale italiano delle energie rinnovabili
- <http://eur-lex.europa.eu> : leggi europee
- <http://www.governo.it>
- <http://www.sviluppoeconomico.gov.it>
- <http://www.pvcycle.org>
- <http://borsarifiuti.com>
- <http://www.epia.org> : European Photovoltaic Industry Association
- <http://www.ren21.net> : Renewables 2011, Global Status Report
- <http://www.gse.it>
- <http://www.ecolight.it/>
- Atlante impianti fotovoltaici ATLASOLE, strumento del GSE scaricabile dal sito: <http://atlasole.gse.it/atlasole/>
- Rapporto statistico 2010_ Solare fotovoltaico redatto dal GSE
- Bombach E., Röver I., Müller A., Schlenker S., Wambach K. e Wefringhaus E. “Technical Experience during thermal and chemical recycling of 23 years old pv generator formerly installed on Pellworm Island”, 21st European photovoltaic solar energy conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany
- Energia Rinnovabile supplemento all’Informatore Agrario n°16/2011 Aprile-Giugno
- Art. “Quarto Conto Energia_Le principali novità per gli impianti fotovoltaici” di TuttoNormel numero di Giugno 2011, sito internet: <http://www.tne.it/>
- Relazione generale sull’attività dell’Unione Europea 2010
- Rapporto Comuni Rinnovabili 2011 di Legambiente
- Bombach E., Müller A., Wambach K. e Röver I. “Recycling of solar cells and modules recent improvements”, Proceedings of the 20th EU PVSEC, Barcelona, Spain, 2005 (Processo riciclaggio moduli cristallini della Deusch Solar)
- Klugmann-Radziemska E. e Ostrowski P. “Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules”, Renewable Energy, 2010 (Processo riciclaggio moduli cristallini della Deusch Solar)

RINGRAZIAMENTI

Molte sono le persone che meritano un ringraziamento per aver contribuito alla realizzazione della tesi.

Un particolare ringraziamento alla professoressa Monia Montorsi che mi ha permesso di esaudire il desiderio di redigere una tesi sulle fonti rinnovabili e di svolgere lo stage presso l'azienda S.A.BA.R. S.p.A.. Inoltre la ringrazio per la cortesia e pazienza mostrata nel seguirmi e indirizzarmi verso la corretta stesura della presente tesi.

Un grazie pieno d'affetto vorrei rivolgerlo all'Ing. Giulia Broglia, che con la sua dolcezza e dedizione mi ha seguito e aiutato nelle attività sperimentali svolte presso i laboratori del DIMA (Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e dell'Ambiente) dell'Università di Modena e Reggio Emilia. Colgo l'occasione per ringraziare anche la prof.ssa Cristina Siligardi, che ci è stata d'aiuto nella definizione della metodologia sperimentale da effettuare per l'analisi micro strutturale dei pannelli fotovoltaici. Ringrazio, inoltre, l'Ing. Matto Dignatici per aver collaborato nelle attività di laboratorio.

Ringrazio l'azienda S.ABA.R. S.p.A., e in particolare il Direttore Dott. Mirco Marastoni, per avermi dato la possibilità di svolgere un periodo di stage presso il loro stabilimento, offrendomi l'opportunità di imparare un'elevata quantità di nozioni relative ai rifiuti e alle energie rinnovabili, nonché avermi dato la possibilità di partecipare alle attività aziendali.

Riservo la più profonda gratitudine all'Ing. Marco Boselli, per avermi accolto nel suo ufficio, avermi reso partecipe di ogni sua attività lavorativa, avermi aiutato e, in certi casi spronato, a svolgere al meglio lo studio della tesi e avermi portato con sé ad ogni incontro, riunione o fiera di ogni genere, con il solo obiettivo di farmi crescere dal punto di vista professionale. Lo ringrazio calorosamente per avermi trasmesso, oltre a conoscenze utili, principi di serietà e impegno da assumere nel lavoro.

Non dimenticherei mai di ringraziare tutti i dipendenti S.A.BA.R. S.p.A., che non mi hanno mai negato un sorriso e con cordialità e simpatia, mi hanno accolto nella loro quotidianità lavorativa mettendomi a disposizione ogni loro conoscenza e permettendomi di imparare sempre di più.

Un ringraziamento particolare all'azienda Eletric World S.r.l. per aver fornito i pannelli fotovoltaici esausti su cui effettuare lo studio presentato nella tesi, e un'ulteriore ringraziamento alla Società Cooperativa CPL Concordia per avermi fornito nozioni tecniche sugli impianti fotovoltaici.

Oltre a tutti coloro che hanno partecipato attivamente alla stesura della tesi, vorrei aggiungere altri ringraziamenti che riguardano la sfera affettiva della mia carriera universitaria.

Prima di tutti ringrazio i miei genitori, Daniele ed Anna, che fin dalla nascita non mi hanno mai fatto mancare nulla e mi hanno sempre sostenuta in tutte le mie attività, da quelle serie a quelle più strampalate, indicandomi con affetto e serietà la strada corretta da seguire. Vi ringrazio con la speranza di rendervi fieri di me ora che sono giunta al termine degli studi universitari.

Un grande grazie a Carlo che con infinita pazienza mi ha sempre sopportata e sostenuta nell'intero corso dei miei studi universitari, non perdendo occasione per dimostrare la sua affettuosa presenza.

Infine desidero ringraziare i miei compagni di studi con i quali ho condiviso difficoltà e soddisfazioni. Ragazzi l'università è terminata, abbiamo con fatica raggiunto uno dei nostri obiettivi della vita, ora dobbiamo dimostrare di essere persone di valore che sappiano plasmare il nostro futuro.

Giulia Ferretti