

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile



Building Integrated Photovoltaics (BIPV)

Soluzioni innovative e confronto con tecnologie convenzionali

Candidato: Pietro Aronica
Matricola: 242318
Anno Accademico: 2017/2018

Relatore: Prof. Carlo Caldera

Indice

Introduzione.....	5
1. Tecnologia fotovoltaica convenzionale.....	7
1.1. Radiazione solare.....	7
1.2. Effetto fotovoltaico.....	9
1.3. Cella fotovoltaica in silicio cristallino.....	10
1.4. Moduli fotovoltaici in silicio monocristallino e policristallino.....	11
1.4.1. Differenze tecniche ed estetiche.....	13
1.5. Moduli fotovoltaici a film sottile.....	17
1.5.1. Moduli in silicio amorfo.....	18
1.5.2. Moduli CIS-CIGS.....	21
1.5.3. Moduli CdTe.....	21
1.6. Generazioni fotovoltaiche.....	21
1.6.1. Fotovoltaico di prima generazione	22
1.6.2. Fotovoltaico di seconda generazione.....	22
1.6.3. Fotovoltaico di terza generazione.....	22
2. Integrazione architettonica del fotovoltaico.....	23
2.1. Livelli di integrazione architettonica.....	24
2.1.1. Impianti non integrati.....	24
2.1.2. Impianti parzialmente integrati.....	25
2.1.3. Impianti totalmente integrati (BIPV).....	26
2.2. Previsioni di mercato per il fotovoltaico integrato negli edifici.....	27
2.3. Criteri guida per la progettazione integrata.....	29
2.3.1. Aspetti energetici.....	30
2.3.1.1. Posizionamento.....	30
2.3.1.2. Fenomeni di ombreggiamento.....	31
2.3.1.3. Ventilazione.....	32
2.3.2. Calcolo dell'energia prodotta da un sistema BIPV.....	33
2.4. Esempi di soluzioni BIPV.....	36
2.5. Fotovoltaico integrato nell'edilizia storica.....	44
2.5.1. Analisi dei vincoli architettonici e paesaggistici.....	44
2.5.1.1. Beni architettonici.....	44
2.5.1.2. Beni paesaggistici.....	45
2.5.1.3. Autorizzazione paesaggistica.....	45
2.5.2. Linee guida MIBAC.....	48
2.5.2.1. Il fotovoltaico nelle linea guida MIBAC.....	48
2.5.3. Esempi di soluzioni nell'edilizia storica.....	49

3. Fotovoltaico innovativo per l'integrazione architettonica.....	52
3.1. Fotovoltaico a concentrazione.....	54
3.2. Building Integrated Concentrating Photovoltaics (BICPV).....	55
3.2.1. BICPV a media concentrazione.....	55
3.2.2. BICPV a bassa concentrazione.....	60
3.3. Fotovoltaico con celle organiche.....	66
3.3.1. Funzionamento del fotovoltaico organico.....	69
3.2.2. Dati tecnici di moduli fotovoltaici a base di composti organici.....	71
3.4. Building Integrated Organic Photovoltaics (BIOPV).....	73
3.4.1. Esempi di applicazioni BIOPV su strutture esistenti.....	73
3.4.2. Esempi di applicazioni BIOPV su strutture ex novo.....	75
3.4.3. Montaggio di un sistema OPV su struttura esistente.....	76
3.5. Solar Roof di Tesla.....	78
3.5.1. Tipologie di tegole.....	79
3.5.2. Tecnologia applicata.....	80
3.5.3. Considerazioni economiche.....	83
4. Confronto di un sistema OPV con un sistema al silicio cristallino.....	84
4.1. Sunny Portal.....	85
4.2. Simulatore PVGIS.....	94
4.2.1. Dati di input.....	94
4.2.2. Dati di output.....	95
4.3. Analisi dei dati ottenuti.....	97
4.4. Sintesi dei risultati.....	101
 Conclusioni.....	 102
 Bibliografia.....	 103
 Sitografia.....	 104

Introduzione

Negli ultimi anni il problema energetico globale e la crescente preoccupazione per i cambiamenti climatici con l'eccessiva emissione di CO₂ in atmosfera, non hanno portato altro che ad un sempre più spiccato interesse nei confronti delle energie rinnovabili. Con il termine "rinnovabili" ci si riferisce a tutte quelle forme di energia prodotte da fonti che per loro caratteristica intrinseca non sono esauribili nella scala dei tempi umani. In Europa il settore edilizio occupa oltre il 40% dei consumi totali di energia e temi come l'efficienza energetica e l'ecosostenibilità hanno assunto con il tempo ruoli sempre più importanti diventando sinonimi di qualità del costruire.

La strategia generale per il contenimento dei consumi energetici all'interno del mondo edilizio è basata su due metodi complementari: in un primo momento viene posta l'attenzione sulla riduzione della domanda energetica tramite una sempre più attenta efficienza energetica da parte dell'involucro edilizio e in una seconda fase si pone l'attenzione sull'autoproduzione di energia pulita attraverso l'impiego di fonti rinnovabili. Sono quindi sempre più di particolare rilevanza i così detti *Nearly Zero Energy Building* (NZEB) che cercano di unire le due strategie prima citate per realizzare un edificio in grado di autosostenersi quasi completamente e ridurre così la sua dipendenza dal combustibile fossile.

Il termine NZEB viene utilizzato per la prima volta nelle Direttive Europee EPBD (Energy Performance Building Directions) del 2010 (31/2010/CE). Gli stati membri si sono successivamente impegnati nell'introduzione di normative nazionali per promuovere la realizzazione di edifici energeticamente efficienti. Le Direttive Europee EPBD danno indicazioni in merito ai termini ultimi, oltre i quali tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno essere NZEB, nello specifico il 2021 per l'edilizia privata e il 2018 per quella pubblica. Tali direttive contengono la definizione di NZEB, ma lasciano la libertà ad ogni stato di individuare le specifiche caratteristiche che definiscono tale una costruzione e le procedure per realizzarla. Questa particolarità ha permesso di tenere in considerazione tradizioni e specificità locali. Ogni stato membro ha quindi recepito le direttive, emanando una propria normativa in materia. In Italia il tema dell'efficienza energetica arriva con il D.lgs. 192/2005, poi modificato dal D.L. 63/2013, divenuto L. 90/2013 per integrare alcuni aspetti richiesti dalle EPBD che ancora mancavano. Questa legge tratta, quindi, di efficienza energetica e integrazione nel sito di fonti rinnovabili per la produzione di energia. Un ulteriore intervento normativo avvenuto nel 2015 ha poi completato il tema con l'entrata in vigore del DM 26 giugno 2015 "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti

minimi degli edifici". Nel decreto vengono definite le caratteristiche che un edificio deve possedere per essere considerato un NZEB.

È proprio nella direzione degli NZEB che si muove il settore dei sistemi *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV) che cerca di unire in un'unica entità il concetto di impianto fotovoltaico con quello di sistema edilizio per creare un prodotto unico in grado di soddisfare tutti i requisiti tecnologici normalmente richiesti dall'involucro edilizio permettendo al tempo stesso di produrre energia rinnovabile.

Dato quindi il crescente valore, se non indispensabile, del settore fotovoltaico all'interno del contesto edilizio, il seguente lavoro di tesi si pone l'obiettivo di mostrare esaurientemente un panorama delle tecnologie fotovoltaiche di nuova generazione per integrazione architettonica che presto entreranno a far parte del nuovo modo di progettare edifici ma anche nella riqualificazione di edifici esistenti. In particolar modo verranno illustrate le principali modalità d'impiego, le caratteristiche tecniche e le prestazioni di questi sistemi. Ci si potrà orientare agevolmente nella distinzione delle varie tecnologie che da qui a poco entreranno nel mercato globale e di riconoscerne i punti di forza e i migliori compromessi perseguibili.

L'analisi delle tecnologie fotovoltaiche di nuova generazione si concluderà infine con un confronto tra un sistema innovativo *Organic Photovoltaic* (OPV) e un sistema convenzionale al silicio cristallino.

1. Tecnologia fotovoltaica

1.1. La radiazione solare

La sorgente energetica di un sistema fotovoltaico è rappresentata dalla radiazione solare, ossia l'energia elettromagnetica emessa dal sole. Questa appare come un fascio ben collimato e copre un ampio campo di lunghezze d'onda (ovvero energie) con una distribuzione spettrale dall'ultravioletto (UV) all'infrarosso (IR) con un picco massimo nel campo del visibile. L'atmosfera filtra gran parte della radiazione solare facendo arrivare fino a noi praticamente solo la parte del visibile, i raggi UV sotto gli $0,3 \mu\text{m}$ vengono arrestati dallo strato di ozono mentre l'infrarosso viene bloccato dal vapore acqueo e dall'anidride carbonica. In sostanza si può dire che la radiazione solare fisicamente disponibile è pari a circa a metà di quella potenzialmente disponibile. L'intensità della radiazione solare sulla superficie terrestre dipende inoltre dallo spessore d'aria attraversato rapportato al percorso più breve possibile (sole allo zenit), tale grandezza viene chiamata Air Mass (AM). L'atmosfera oltre che assorbire la radiazione solare la diffonde e la riflette. Le condizioni meteorologiche influenzano la quantità di luce solare diretta e diffusa: una giornata limpida presenta il 10% di radiazione diffusa mentre in una giornata nuvolosa la radiazione risulta quasi completamente diffusa. La composizione spettrale incidente è quindi fortemente influenzata dalle condizioni meteorologiche. L'efficienza dell'impianto fotovoltaico, di conseguenza, dipende dalla località e dalle condizioni atmosferiche. I sistemi fotovoltaici hanno comportamenti differenti rispetto alla radiazione solare incidente e diffusa, i sistemi a concentrazione (analizzati nello specifico caso dell'integrazione edilizia in seguito) risultano quasi insensibili alla radiazione diffusa mentre i più classici pannelli sono sensibili ad entrambe le radiazioni ma con modalità differenti in base all'inclinazione e al tipo di pannello. La componente riflessa viene chiamata "componente di albedo" e influenza la produzione o meno di elettricità sia in base all'inclinazione del pannello PV e sia in base alle proprietà riflettenti del territorio circostante. La radiazione complessiva captata dal componente PV risulta quindi data dalla somma delle tre componenti: diretta, diffusa e di albedo.

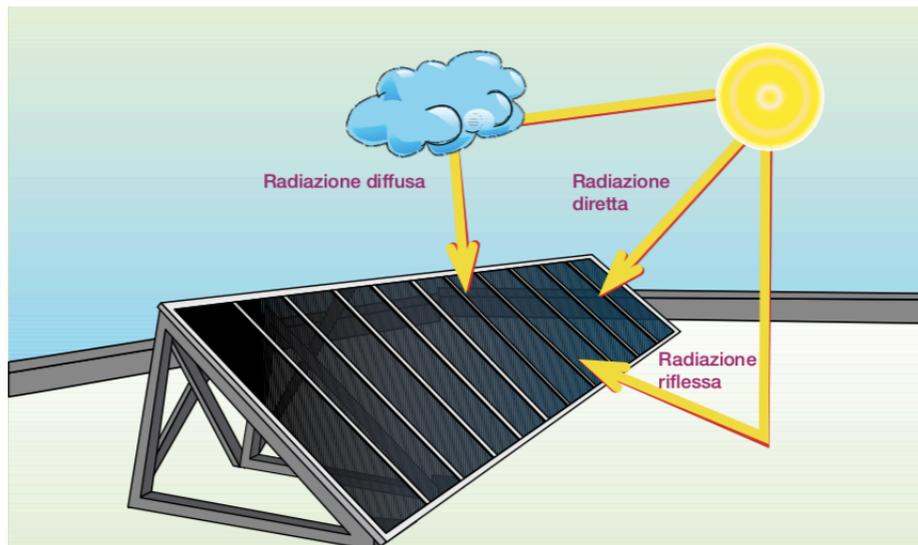


Figura 1.1 schema della radiazione solare diretta, diffusa e riflessa (fonte: www.indexspa.it)

Al fine di valutare l'effettiva produzione elettrica di un qualsiasi impianto fotovoltaico che sia questo integrato in un involucro edilizio o no occorre conoscere i valori di irraggiamento del sito interessato. L'Italia presenta una varietà del potenziale di irraggiamento piuttosto ampia, questa viene riportata nella carta della radiazione totale annua incidente su un piano orizzontale messa a disposizione dalla European Commission tramite il sistema PVGIS. Esistono anche altri atlanti fotovoltaici come ad esempio il sistema Solargis. Sulla superficie terrestre la quantità di energia solare radiante viene espressa tramite l'irradianza sull'unità di superficie ovvero la potenza istantanea che colpisce la data superficie e l'unità di misura viene espressa in W/m^2 . La quantità di energia utilizzata da un dispositivo fotovoltaico dipende dall'irraggiamento del sito, ovvero la quantità di energia solare (misurata in kWh) incidente sulla superficie unitaria (m^2) nell'unità di tempo. Di sotto viene riportata la carta italiana con la media annua dell'irraggiamento solare espressa in kWh/m^2 .



Figura 1.2 media della radiazione solare annua (fonte: www.solargis.info)

1.2. Effetto fotovoltaico

Viene chiamato effetto fotovoltaico la conversione diretta di energia solare in energia elettrica. Tale effetto si verifica quando un fotone, dotato di sufficiente energia, viene assorbito da un materiale (solitamente un semiconduttore) facendo passare un suo elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione diventando così libero di spostarsi. Questo processo è alla base delle celle solari o fotovoltaiche per la produzione di energia elettrica. I semiconduttori presentano proprietà elettriche intermedie tra quelle dei conduttori (come i metalli) e gli isolanti (come le plastiche), presentando dunque una resistività elettrica molto maggiore di quella dei conduttori ma non uguagliabile agli altissimi valori degli isolanti. Il semiconduttore largamente più diffuso è il silicio che presenta una serie di vantaggi come l'abbondanza, la compatibilità ambientale, le buone proprietà elettroniche e la durabilità nel tempo.

1.3. Cella fotovoltaica convenzionale in silicio cristallino

Come descritto nel paragrafo precedente, la cella fotovoltaica sfrutta l'effetto fotovoltaico per produrre energia elettrica. Circa il 90% delle celle utilizza come semiconduttore il silicio (Si) che viene opportunamente drogato con altri elementi per creare un moto di cariche elettriche all'interno della cella stessa. Il silicio possiede 4 elettroni di valenza nell'orbita più esterna che partecipano quindi alle interazioni con altri atomi. Il legame tra due atomi di silicio può essere spezzato dall'assorbimento di un fotone, dotato di energia sufficiente, portando quindi l'elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione e lasciandolo così libero di spostarsi contribuendo al flusso di elettricità. Passando alla banda di conduzione l'elettrone si lascia dietro una lacuna che viene vista come una carica positiva. L'elettricità viene sfruttata creando un moto coerente di elettroni e lacune (quindi una corrente) attraverso un campo elettrico interno alla cella. Per ottenerlo si utilizza un semiconduttore come il silicio con una struttura chiamata "a diodo" realizzata con particolari trattamenti di drogaggio inserendo in due regioni distinte del reticolo di silicio atomi chiamati donori (es: fosforo, simbolo P) e accettori (es: boro, simbolo B). Il fosforo, presentando 5 elettroni di valenza, ovvero uno in più rispetto al silicio, rende la sua regione dotata di una carica negativa in eccesso mentre la regione occupata dal boro, dotato di soli 3 elettroni di valenza, crea una regione dotata di una carica positiva in eccesso. Il primo strato contenente fosforo si indica con n (regione negativa), il secondo strato contenente boro si indica con p (regione positiva) mentre la zona di collegamento viene chiamata giunzione p-n. Le cariche negative si spostano dalla zona n verso la zona p mentre le lacune migrano dalla zona p verso la zona n creando così la fascia di giunzione che consente il mantenimento della separazione delle cariche mobili e della differenza di potenziale. Nel momento in cui si sottopone alla radiazione solare la zona n si ottiene una continua liberazione di elettroni e quindi un passaggio di corrente fotogenerata.

La cella fotovoltaica al silicio prevede uno strato di silicio di tipo p con spessore di circa 0,2 mm sulla cui faccia posteriore viene applicato uno strato di alluminio uniforme unito al silicio dopo cottura in forno in atmosfera controllata. Sulla faccia anteriore viene invece effettuato un leggero drogaggio di impurità di tipo n attraverso la tecnica della diffusione termica ad alta temperatura ottenendo una superficie lucida e trasparente alla radiazione solare che verrà successivamente trattata con una superficie antiriflesso per un migliore assorbimento delle radiazioni.

Il rendimento di una cella solare è funzione di tre variabili: intensità della radiazione solare incidente, temperatura e area della cella. Maggiore è la radiazione solare e maggiore sarà il rendimento della cella, stesso ragionamento vale per l'estensione dell'area della cella stessa, ovvero

maggiore è l'area a disposizione e maggiore sarà il rendimento, mentre un aumento di temperatura causa una riduzione della produzione energetica, questa diminuzione cambia in base al tipo di materiale impiegato (il silicio ad esempio presenta diminuzioni di rendimento maggiori rispetto ad esempio a celle costituite da arseniuro di gallio).

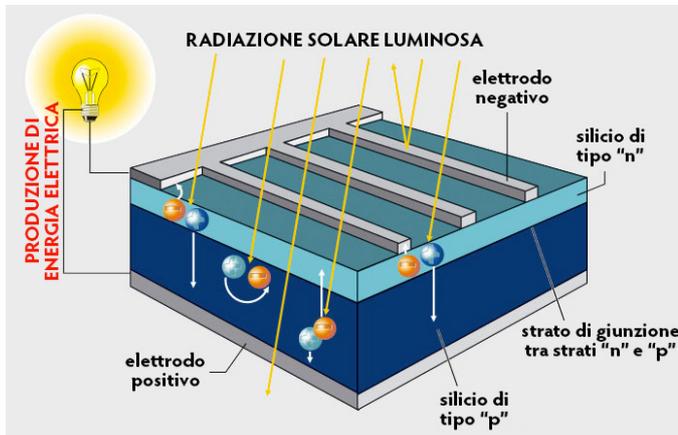


Figura 1.3 funzionamento di una cella solare
(fonte: www.net4energy.it)



Figura 1.4 esempio di cella solare in silicio policristallino
(fonte: www.solarinnova.net)

1.4. Moduli fotovoltaici in silicio monocristallino e policristallino

L'unione di più celle fotovoltaiche permette di creare un modulo fotovoltaico (o pannello fotovoltaico) e più moduli fotovoltaici creano un impianto fotovoltaico. Questo aspetto si può considerare per quanto riguarda il mondo dei prodotti costituiti da silicio mono e policristallino in quanto nel caso di altre tecnologie come ad esempio il silicio amorfo (analizzato in seguito) non si può propriamente parlare di cella fotovoltaica.

Un modulo fotovoltaico è dunque costituito da più celle solari collegate tra di loro in parallelo o in serie in base ai valori di tensione e corrente che si vogliono ottenere. Le celle vengono raggruppate all'interno di un modulo fondamentale per poter godere di una maggiore robustezza, una migliore praticità di installazione e una migliore resistenza agli agenti atmosferici.

Il processo di produzione dei pannelli solari è costituito da tre passaggi chiave: il collegamento elettrico tra le diverse celle costituenti il modulo, l'incapsulamento delle celle e il montaggio della cornice esterna. La realizzazione del modulo viene eseguita assemblando i vari strati a sandwich partendo da uno strato di fondo realizzato in materiale isolante a bassa dilatazione termica fungendo da base di supporto per gli altri strati. Il secondo strato è costituito da un foglio sottile di una plastica copolimerica di etilene vinil acetato (EVA), il terzo strato è rappresentato dalle celle solari collegate elettricamente tra di loro, il quarto strato è costituito nuovamente da EVA mentre

l'ultimo strato è costituito da una lastra di vetro temperata ad altissima trasparenza. Una volta assemblato il pannello questo viene sottoposto ad un procedimento di pressofusione che permette di far fondere gli strati di EVA fissando così in modo permanente i vari componenti tra di loro. Al termine di questo processo viene assemblata la cornice esterna solitamente in alluminio anodizzato. Il rendimento dei pannelli mono e policristallini presenta un calo di circa l'1% l'anno. In media questi funzioneranno al 90% della propria potenza nominale dopo 10 anni e all'80% dopo 20 anni e così via. La progressiva perdita di efficienza ne rende necessaria prima o poi la dismissione o la sostituzione nonostante la vita minima sia comunque superiore ai 25 anni.

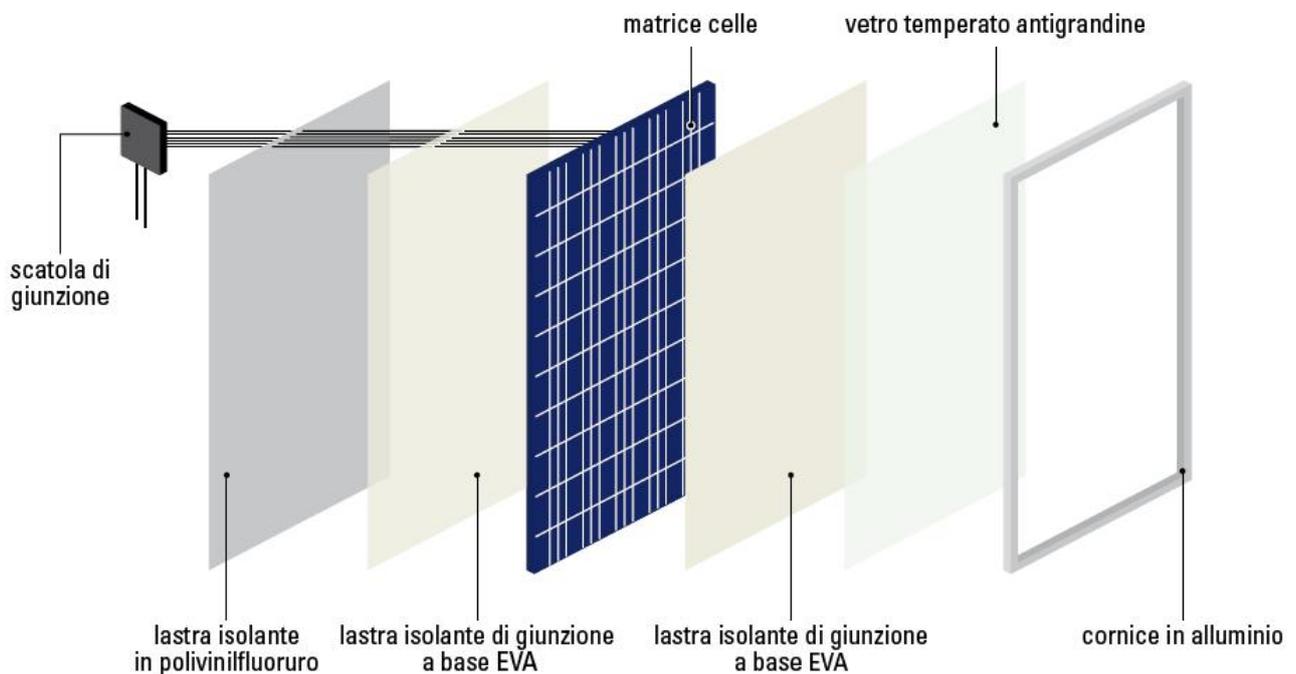


Figura 1.5 stratigrafia modulo fotovoltaico in silicio policristallino (fonte: www.idrotecnosarda.net)

I pannelli utilizzati in edilizia, nel caso di soluzioni fotovoltaiche non integrate, sono quelli schematizzati in figura 1.5. Tuttavia i sistemi maggiormente diffusi all'interno dell'integrazione architettonica sono quelli inglobati nei soli pannelli di vetro. L'impiego di questa particolare soluzione risulta essere estremamente versatile prestandosi molto bene all'inserimento in tutti quei sistemi che sfruttano il vetro come elemento architettonico principale.

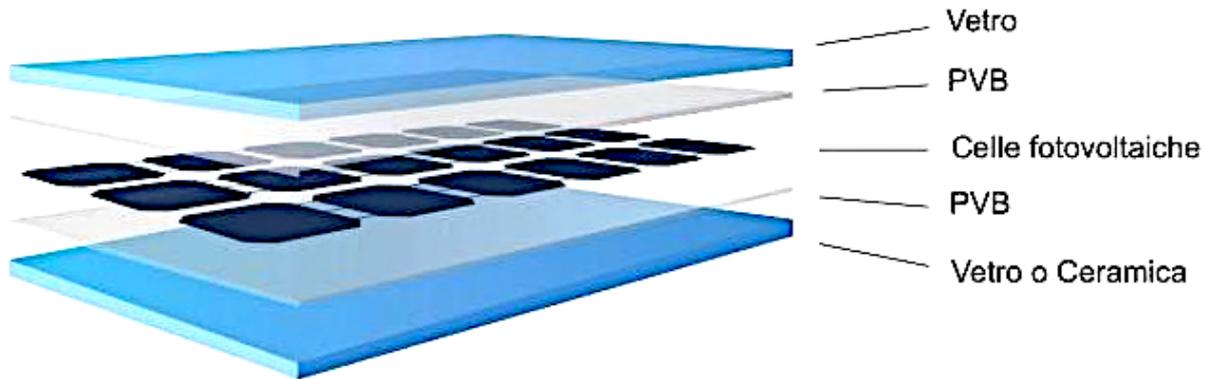


Figura 1.6 schema di un pannello fotovoltaico in vetro (fonte: www.energyglass.eu)

1.4.1. Differenze tecniche ed estetiche

La lavorazione industriale del silicio monocristallino (Mono c-Si) risulta più complessa e costosa rispetto a quella del silicio policristallino (Multi c-Si) in quanto necessita di un grado di purezza maggiore, il prodotto finale è composto da lunghe barre di silicio (dette lingotti) che andranno successivamente tagliate in fette sottili (wafer di silicio) le quali costituiranno la cella solare.

Solitamente le barre di silicio monocristallino presentano sezione circolare, questa viene successivamente tagliata per andare a formare dei quadrati con angoli smussati in modo da sfruttare in maniera più efficiente la quantità di superficie disponibile all'interno del modulo fotovoltaico impiegato. Un pannello in silicio monocristallino presenta di solito un'efficienza maggiore rispetto a quelli in silicio policristallino (solitamente tra il 14 e il 19%). Il processo di produzione del silicio policristallino risulta meno complesso e costoso, il prodotto presenta una minor purezza e il rendimento oscilla tra il 12 e il 15%. Di seguito vengono descritti in maniera sintetica i processi di lavorazione del silicio mono e policristallino in modo da esporre con più chiarezza le differenze tipologie di produzione.

Produzione silicio monocristallino	si parte da un singolo cristallo di silicio (più complesso da realizzare), il blocco viene fatto crescere lungo un'unica direzione.
Produzione silicio policristallino	si parte da un cristallo multifaccettato (più facile da ottenere), il blocco viene fatto crescere in più direzioni



Figura 1.7 produzione del silicio mono e policristallino (Fonte: www.solarinnova.net)

A livello estetico si possono facilmente distinguere i due prodotti in quanto i pannelli in silicio policristallino, proprio per la loro natura multicristallina risultano di un blu molto più acceso rispetto al monocristallino che apparirà di una tonalità più scura (quasi tendente al nero). Il tipico colore blu/azzurro delle celle solari in silicio è giustificato dal fatto che tale colore è quello che maggiormente ottimizza l'efficienza energetica della cella fotovoltaica, ma questo non implica che sia l'unica soluzione disponibile sul mercato, nel caso di specifiche necessità estetiche si possono anche ottenere moduli fotovoltaici dotati di altre colorazioni a condizione di perdere una percentuale (più o meno variabile in base al tipo di colore) sull'efficienza di produzione elettrica della cella. Di seguito vengono riportate le immagini comparative dei pannelli in silicio monocristallino e policristallino.

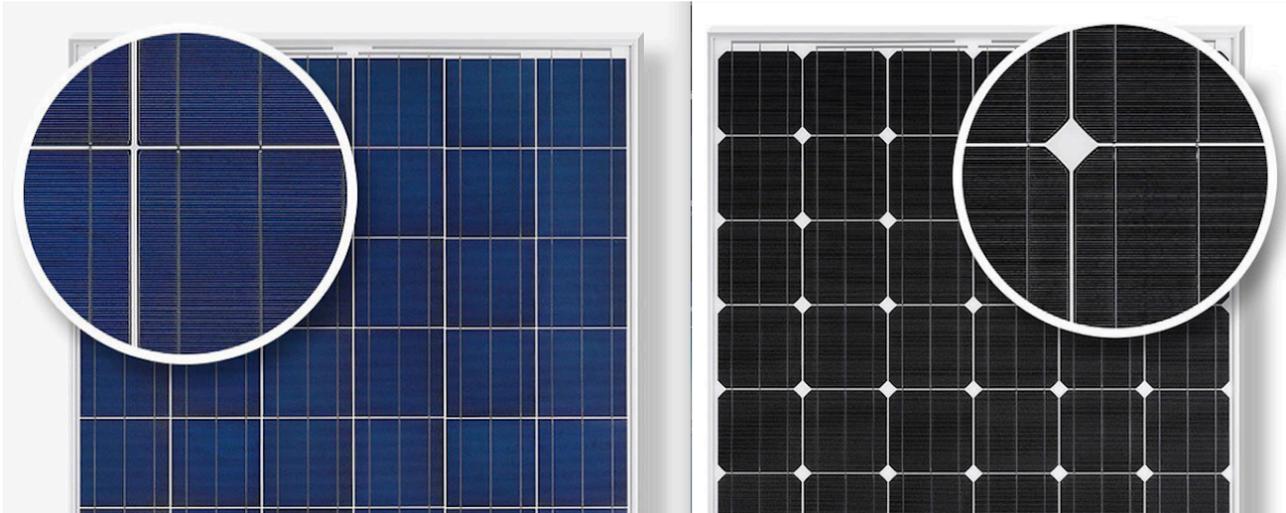


Figura 1.8 pannello policristallino a sinistra e pannello monocristallino a destra (fonte: www.solarinnova.net)

Come citato in precedenza, i moduli fotovoltaici di entrambe le tecnologie possono variare in entrambi i casi l'aspetto estetico per meglio adattarsi alle varie esigenze di integrazione architettonica con una migliore mimetizzazione. Solitamente il tipico blu utilizzato per le celle più standard può essere sostituito da una serie di colorazioni alternative, nel seguito vengono riportate due tabelle: la prima mostra la forma delle celle solari e il motivo prodotto mentre la seconda illustra la perdita di rendimento che si ottiene modificando il colore della cella.

	Quadrata	Angoli troncati	Angoli arrotondati	Rotonda
1				
2				
3				

Figura 1.9 1: forma cella 2: motivo prodotto dall'assemblaggio delle celle 3: zoom sugli spazi tra le celle (fonte: www.bipv.ch)

Colore	Celle multicristalline (mc-Si)	Celle monocristalline (sc-Si)
Blu	100%	100%
Grigia	73-80%	84%
Rossa	77-80%	n.d.
Marrona	81-90%	87%
Giallo	83-93%	81%
Verde	86-98%	n.d.
Magenta	n.d.	78%

perdita di rendimento in base alle varie colorazioni della cella (fonte: www.bipv.ch)

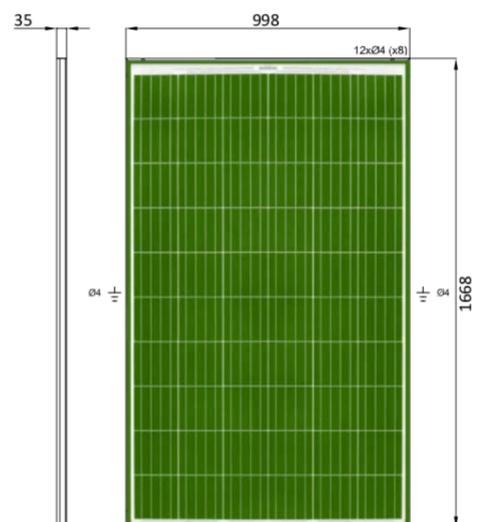
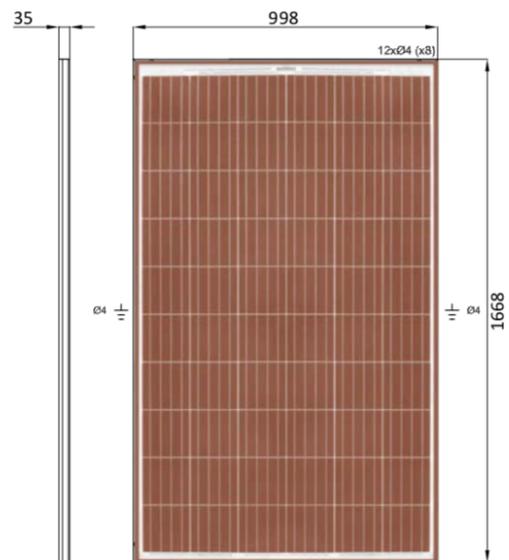


Figure 1.10 esempi di pannelli in silicio policristallino in colorazione rossa e verde (fonte: scheda tecnica GruppoSTG)

1.5. Moduli fotovoltaici a film sottile

I moduli a film sottile, tecnologia più recente rispetto ai pannelli in silicio mono e policristallino, nascono dalla necessità del mercato di fornire nuove tecnologie a prezzi più competitivi. Questi moduli sono depositati su substrati di vasta area quali lastre di vetro, fogli di plastica o di metallo e la loro flessibilità li rende materiali altamente versatili. Il fotovoltaico a film sottile ha il grande vantaggio di fornire prodotti a costi ridotti con tuttavia una riduzione di efficienza a parità di m^2 . L'economicità del prodotto deriva dagli elevati volumi di produzione ottenibili, dalla completa automatizzazione del processo e dalle piccole quantità di materiale fotoattivo impiegato (qualche micron o addirittura inferiori come nel caso del silicio amorfo). Inoltre tali tecnologie possono tollerare un grado maggiore di impurezze, consentendo così processi di purificazione meno costosi. La fabbricazione dei moduli a film sottili risulta essere a basso consumo energetico presentando un energy pay-back time (EPBT) ridotto rispetto alle tecnologie più tradizionali che impiegano processi industriali più complessi consumando più energia. L'energy pay-back time è il tempo che deve impiegare un modulo fotovoltaico per restituire l'energia spesa per fabbricarlo, nel caso delle tecnologie a film sottile il tempo di ritorno è di circa un anno.

La peculiarità di questi moduli consiste nella possibilità di essere esteticamente attraenti con elevata adattabilità di forma, dimensione e trasparenza e quindi una più ampia versatilità in ambito edilizio. I film sottili presentano un miglior rendimento energetico rispetto ai moduli convenzionali di pari potenza nominale dipendendo meno dalla temperatura di funzionamento (nei mesi estivi può arrivare anche a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$) e mostrando una miglior risposta alla componente diffusa della luce in condizioni di cielo nuvoloso quando l'irradiazione diretta è meno marcata (condizione standard di irraggiamento: $1000\text{ W}/m^2$). Tali tecnologie permettono dunque, a parità di potenza, una maggior quantità di energia prodotta.

Le principali tecnologie a film sottile utilizzano diversi materiali semiconduttori inorganici quali:

- Silicio amorfo (A-Si)
- Diseleniuro di Rame – Indio (CIS) e Diseleniuro di Indio - Rame – Gallio (CIGS)
- Tellururo di cadmio (CdTe)
- Arseniuro di Gallio (GaAs) (non utilizzato in edilizia)

Le prestazioni di questi materiali risultano anche molto diverse tra di loro, nel seguito vengono descritte in sintesi le varie caratteristiche di ognuno di essi per capire i vantaggi e gli svantaggi di ognuna. L'Arseniuro di Gallio (GaAs), rappresenta il miglior prodotto in assoluto con un rendimento anche fino al 30%, un degrado estremamente ridotto e una resistenza superiore ad ogni altro materiale alle alte temperature, ma a causa della sua rarità, delle complesse lavorazioni e dei costi molti alti rappresenta una valida soluzione solo per applicazioni militari e spaziali e per questo motivo non verrà successivamente trattato.

Nel caso dei moduli a film sottile è improprio parlare di celle solari in quanto il materiale fotoattivo viene distribuito direttamente su tutto il modulo in maniera continua, tuttavia per questioni di esposizione verrà comunque fatto riferimento al termine "cella solare" per indicare la stratigrafia da realizzare per ottenere la produzione di corrente elettrica, tale stratigrafia, assieme ad un substrato andrà a costituire il modulo.

1.5.1. Moduli a film sottile in silicio amorfo

Il silicio, nella sua forma amorfa, presenta una struttura molto disordinata. Non si ha quindi la tipica disposizione cristallina che caratterizza i convenzionali moduli fotovoltaici in silicio monocristallino e policristallino.

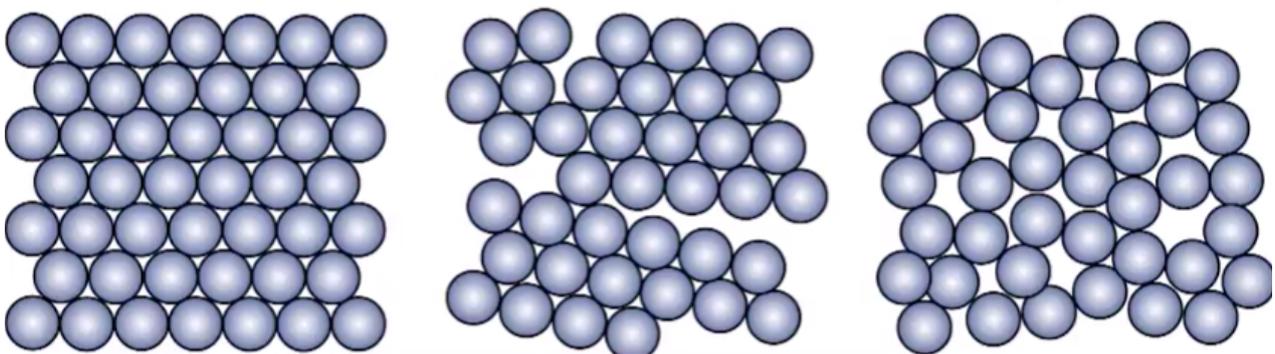


Figura 1.11 in ordine: struttura monocristallina, struttura policristallina e amorfa

Nel processo produttivo, il silicio amorfo cresce creando dei difetti dovuti alla non saturazione di un certo numero di legami che influenzano negativamente la qualità elettronica del materiale. Si può

rimediare a questo problema introducendo nel materiale atomi di idrogeno che vanno a saturare un certo numero di difetti, in questo caso si parla di silicio amorfo idrogenato (a-Si:H).

Il primo componente in silicio amorfo venne realizzato nel 1976 con un'efficienza del 2,5%, ad oggi si sono raggiunte in laboratorio efficienze superiori anche al 10%. Bisogna ricordare che i moduli in silicio amorfo sono soggetti al fenomeno di degrado denominato effetto staebler-wronski indotto dall'illuminazione che comporta la perdita dell'efficienza energetica nelle prime centinaia di ore di funzionamento del sistema, l'efficienza definitiva del sistema risulta dunque inferiore a quella iniziale e va considerata durante la fase di progettazione dell'impianto.

La cella solare più semplice in silicio amorfo (singola giunzione) è realizzata partendo da tre strati depositati in sequenza: uno strato superiore di tipo p, un secondo di tipo intrinseco (i) e l'ultimo di tipo n. La struttura così ottenuta viene definita struttura p-i-n. La radiazione solare investe lo strato p attraversandolo quasi completamente a causa del suo esiguo spessore (7-20 nm) raggiungendo così lo strato intrinseco i (il più spesso dei tre). Lo strato intrinseco è costituito da silicio amorfo con spessori compresi da 0,3 e 0,5 μm .

La cella viene completata da uno strato superiore, solitamente un vetro su cui viene depositato uno strato di ossido trasparente conduttivo (TCO: Transparent Conductive Oxide), che costituisce anche il contatto superiore della cella, e da uno strato inferiore solitamente costituito da ossido di zinco depositato su un metallo (tipicamente alluminio).

Per aumentare l'efficienza di conversione della radiazione solare, vengono impiegate le celle solari a multigiunzione (solitamente si usano quelle a tripla giunzione). Si crea quindi una struttura costituita da tre giunzioni p-i-n collegate in serie che opportunamente trattate sfruttano meglio lo spettro solare. Il primo strato (ovvero il più esposto alla radiazione solare) assorbe la componente più energetica della radiazione solare (componente blu), il secondo strato assorbe la componente verde della luce mentre l'ultimo strato assorbe i fotoni meno energetici della luce (componente rossa). I vantaggi delle multigiunzioni sono rappresentati da un miglior sfruttamento della radiazione solare complessiva e dalla possibilità di utilizzare strati più sottili per ogni giunzione.

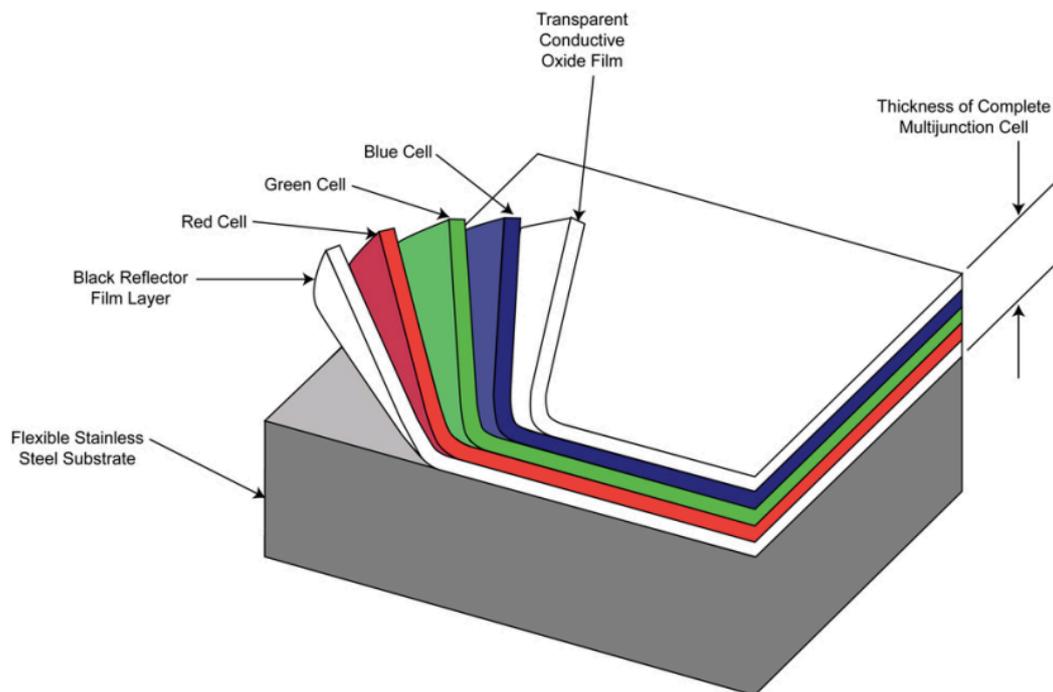


Figura 1.12 schema cella solare a tripla giunzione (fonte: www.uni-solar.com)

I moduli a film sottile in silicio amorfo presentano una colorazione omogenea blu scuro, nera o tendente al marrone e lo spessore complessivo comprensivo del telaio risulta di soli pochi millimetri. Questa caratteristica è particolarmente vantaggiosa in quanto permette di realizzare ad esempio coperture fotovoltaiche senza aumentare di molto il peso della copertura stessa.



Figura 1.13 Esempio di modulo fotovoltaico in silicio amorfo (fonte: www.uni-solar.com)

1.5.2. Moduli a film sottile CIS e CIGS

I moduli CIS sono costituiti da una lega compatta di rame indio e diselenide ovvero “Diseleniuro di Rame e Indio” (CuInSe_2), in acronimo CIS appunto, mentre i moduli CIGS “Diseleniuro di Rame, Indio e Gallio” Cu(InGa)Se_2 presentano la stessa struttura dei moduli CIS ma con l’aggiunta del gallio che permette di ottenere una tecnologia migliore rispetto alla più semplice CIS con efficienze superiori. I moduli a film sottile CIGS sono quelli che presentano la miglior efficienza sul mercato per applicazioni architettoniche arrivando a percentuali del 12/13 %, paragonabili quindi anche ai moduli in silicio policristallino.

1.5.3. Moduli a film sottile CdTe

I moduli in Tellurio di Cadmio (CdTe) sono più efficienti dei moduli in silicio amorfo e il loro processo di realizzazione è completamente automatizzato, questo aspetto consente di abbattere i costi di produzione in grande serie. Il loro svantaggio è dato dall’impiego di numerose sostanze tossiche durante la lavorazione, solo fabbriche idonee e specializzate possono dunque trattare questi tipi di materiali ponendo particolare attenzione al personale sul lavoro, alle materie di scarto e al corretto smaltimento dei pannelli a fine vita. Per non vanificare la logica della sostenibilità ambientale, nel momento in cui si scegliesse questa specifica tecnologia, sarà necessario porre particolare attenzione alla normativa sull’ambiente, sulla salute e sicurezza in tutte le fasi di produzione, manutenzione e smaltimento.

1.6. Generazioni fotovoltaiche

In base al tipo di materiale utilizzato, alla sua struttura chimica e al tipo di tecnologia impiegata si possono classificare 3 sistemi diversi di fotovoltaico:

- Fotovoltaico di prima generazione
- Fotovoltaico di seconda generazione
- Fotovoltaico di terza generazione

1.6.1. Fotovoltaico di prima generazione

Il fotovoltaico di prima generazione è costituito dai sistemi ormai più che convenzionali basati sul silicio cristallino (mono e policristallino). Tale tecnologia risulta ben consolidata e ormai non sono più previsti salti tecnologici rilevanti, ci si limita quindi a diminuire sempre di più i costi di produzione e ad aumentarne l'efficienza. Al momento il fotovoltaico di prima generazione risulta ancora il più utilizzato nonostante il mercato si stia sempre più aprendo ad altre tecnologie.

1.6.2. Fotovoltaico di seconda generazione

La seconda generazione è rappresentata dai moduli a film sottile che hanno visto negli ultimi anni una sempre maggiore diffusione prestandosi estremamente bene all'integrazione architettonica a causa della loro flessibilità, dei costi ridotti e di una maggiore produzione di energia elettrica a parità di potenza di picco installata.

1.6.3. Fotovoltaico di terza generazione

Il fotovoltaico di terza generazione viene definito come quello più innovativo e verrà successivamente trattato in maniera specifica e dettagliata nel capitolo 3. I punti cardine su cui si basa la terza generazione sono essenzialmente due: l'alta efficienza e il basso costo di produzione. Per l'edilizia il fattore dominante risulta essere il costo, che deve essere il più contenuto possibile per permetterne un vasto impiego senza dover alterare in modo significativo il costo complessivo dell'opera.

2. Integrazione architettonica del fotovoltaico

Il concetto di integrazione architettonica nasce in Italia con il DM Sviluppo economico 19 febbraio 2007 (Secondo Conto Energia) inserito poi successivamente nella normativa nazionale e regionale fino ad entrare nei regolamenti edilizi comunali. L'obiettivo principale voleva esaltare le potenzialità della tecnologia solare, ponendo la componente energetica alla base del processo progettuale per poter così arrivare ad una nuova definizione di linguaggio architettonico in cui i pannelli PV diventano un elemento espressivo e caratterizzante per l'architettura proprio come lo sono stati e lo sono tuttora elementi come l'acciaio, il cemento o il vetro. Con l'introduzione del DM 5 maggio 2011 (Quarto Conto Energia) viene definito nello specifico il concetto di «impianto fotovoltaico integrato con caratteristiche innovative» ovvero un sistema che utilizza moduli non convenzionali sviluppati appositamente per sostituire elementi architettonici e come tali con i relativi requisiti costruttivi appropriati all'impiego. Questi moduli sono quindi progettati e realizzati industrialmente per svolgere, oltre alla produzione di energia elettrica, funzioni architettoniche fondamentali quali:

- isolamento termico dell'edificio per garantire il mantenimento dei livelli di fabbisogno energetico grazie a valori di trasmittanza termica comparabili a quelli del componente architettonico sostituito
- tenuta all'acqua e la conseguente impermeabilizzazione della struttura edilizia
- resistenza meccanica comparabile con l'elemento edilizio sostituito.
- Isolamento acustico
- Protezione dall'irraggiamento solare per la riduzione del carico di climatizzazione estivo

Ogni elemento della superficie esterna dell'edificio può essere adatto all'installazione di impianti integrati: chiusure orizzontali, chiusure verticali, componenti trasparenti e schermi frangisole. Prima di illustrazione tutte le diverse applicazioni degli impianti fotovoltaici integrati viene presentata una breve classificazione degli impianti proprio in funzione del loro livello di integrazione per meglio comprendere i diversi sistemi tecnologici.

2.1. Livelli di integrazione architettonica

In edilizia, gli impianti fotovoltaici vengono suddivisi in base al loro livello di integrazione architettonica in 3 diverse tipologie:

- impianti non integrati
- Impianti parzialmente integrati
- Impianti totalmente integrati (BIPV)

2.1.1. Impianti non integrati

Rappresentano tutte quelle tipologie di impianti non complanari alla superficie su cui sono installati. Non svolgono nessuna funzione aggiuntiva rispetto alla loro principale mansione di produttori di energia elettrica e il loro collocamento non è influenzato dalla morfologia dell'edificio. Generalmente trovano collocazione sulle coperture piane e presentano strutture di sostegno in profilati metallici con montanti e traversi fissati a piastre o piccoli plinti di sostegno. Questa soluzione risulta essere quella che maggiormente si discosta dal concetto di integrazione architettonica nonostante presenti diversi vantaggi quali la rapidità e semplicità di montaggio, l'economicità e la maggior efficienza energetica possibile in quanto lo svincolo dei pannelli fotovoltaici dalla morfologia pura dell'edificio permette di ottenere un'inclinazione e un orientamento sempre ottimale per una massima resa energetica. Questa soluzione, come anche la seconda illustrata (fotovoltaico parzialmente integrato) non saranno oggetto specifico di questa tesi.



Figura 2.1 esempio di impianto fotovoltaico in silicio monocristallino non integrato (fonte: www.impelsnc.it)



Figura 2.2 esempio di impianto fotovoltaico a concentrazione non integrato (fonte: www.consulente-energia.com)

2.1.2. Impianti parzialmente integrati

Risulta essere la soluzione ancora maggiormente diffusa, ed è costituita da tutti gli impianti che vengono installati in maniera complanare al manto di copertura o in facciata a poca distanza da essi in modo da adattarsi all'unità tecnologica, che svolge il ruolo di supporto, senza però sostituirsi ad essa. Il ruolo principale di tenuta all'acqua risulta essere ancora a carico dell'unità tecnologica considerata che non presenta quindi nessun tipo di variazione se non per l'installazione su di essa del supporto metallico del sistema fotovoltaico. L'integrazione architettonica risulta dunque solo fittizia ma non effettivamente reale. Anche in questo caso un aspetto favorevole risulta essere la modesta facilità di montaggio dell'impianto che non comporta inoltre una modifica sostanziale del sistema più esterno di chiusura dell'edificio (orizzontale o verticale che sia). L'applicazione dei pannelli fotovoltaici viene eseguita solo dopo il successivo completamento dell'unità tecnologica e si limita al fissaggio degli elementi di sostegno e alla seguente applicazione dei moduli. Bisogna tuttavia ricordare che nonostante questa tipologia di impianto non risulti invasiva da un punto di vista della singola unità tecnologica (come appunto coperture o facciate) non può comunque presentare un grado estetico e visivo al pari di un fotovoltaico totalmente integrato e lascia quindi scarso impiego a tutti quelli interventi sull'edilizia esistente particolarmente soggetta a vincoli urbanistici.

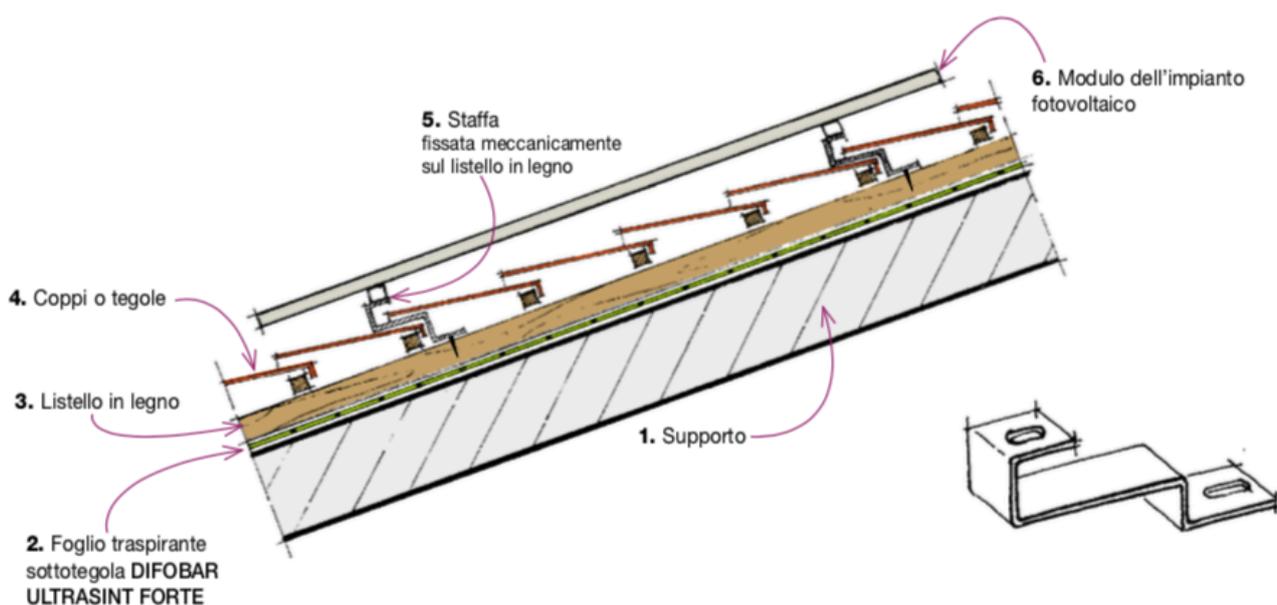


Figura 2.3 stratigrafia di una copertura a falde con sopra un pannello fotovoltaico parzialmente integrato (fonte: scheda tecnica Index)

2.2.3. Impianti totalmente integrati (BIPV)

Con l'acronimo BIPV (Building Integrated Photovoltaics) ci si riferisce ad un sistema in cui l'impianto fotovoltaico, oltre che ad assolvere al suo ruolo primario di produttore di energia elettrica, diventa anche parte integrante del sistema edilizio non sovrapponendosi più su di esso e svolgendo così una doppia funzione (elemento di produzione di energia elettrica ed elemento edilizio vero e proprio). Sarà quindi necessario coniugare gli aspetti tecnici ed estetici dell'impianto fotovoltaico con quelli del sistema edilizio senza compromettere le caratteristiche funzionali e prestazionali di entrambi i sistemi. L'integrazione di tali dispositivi dovrà quindi garantire i requisiti previsti dalle diverse normative vigenti in ambito di prestazioni energetiche, resistenze meccaniche, impermeabilizzazione e isolamento acustico oltre che a garantire il suo ruolo primario di generatore elettrico. L'integrazione architettonica dei sistemi fotovoltaici risulta indispensabile per la realizzazione di nuovi edifici che a partire dal 2021 dovranno essere ad energia quasi nulla (edifici NZEB: Near Zero Energy Building), nel caso di edifici pubblici la scadenza è anticipata già al 2018.

I sistemi BIPV possono essere essenzialmente utilizzati in due tipologie di integrazione:

- Integrazione in facciata (chiusura opaca, chiusura trasparente, sistemi di schermatura, sistemi anticaduta)
- Integrazione in copertura (coperture piane, coperture a falde, coperture a shed)

Esistono anche altre soluzioni di fotovoltaico integrato non propriamente relativo ai sistemi edilizi quali elementi di arredo urbano come pensiline, lampioni per l'illuminazione stradale e barriere acustiche.

L'integrazione architettonica dei sistemi BIPV porta ad un ulteriore vantaggio, ovvero la possibilità di ammortizzare più velocemente i costi aggiuntivi dovuti alla componentistica fotovoltaica abbattendo da subito le spese necessarie al suo montaggio sfruttando la stessa manodopera impiegata per la realizzazione dell'edificio. Risulta evidente che inserire il fotovoltaico in un momento diverso dalla fase di realizzazione dell'opera stessa comporta costi aggiuntivi di manodopera extra, una spesa quindi facilmente evitabile se pensata fin dal primo momento.

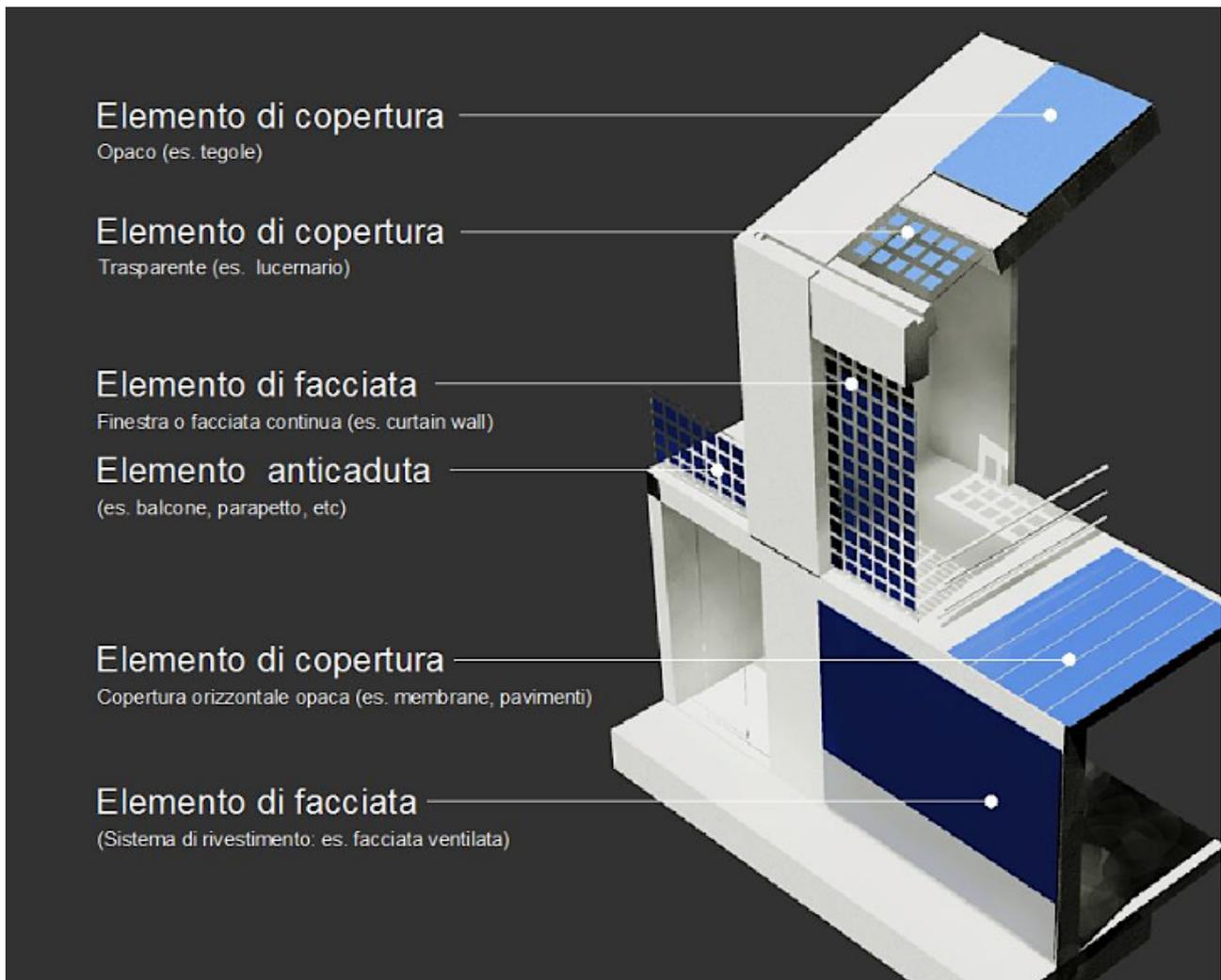


Figura 2.4 schema delle possibili soluzioni BIPV (fonte: www.bipv.ch)

2.2. Previsioni di mercato per il fotovoltaico integrato negli edifici

Gli edifici costituiscono il 40% dell'energia totale consumata in Europa ogni anno. La riduzione del consumo di energia e l'aumento della produzione di energia da fonti rinnovabili nel settore dell'edilizia sono fondamentali per ridurre le emissioni di gas serra. Nel 2015, la Commissione europea ha indicato nel piano strategico per le tecnologie energetiche una serie di obiettivi chiave di ricerca e innovazione che mostrano le priorità europee sulle tecnologie a basse emissioni di carbonio. Uno di questi obiettivi è consentire la realizzazione in massa di edifici NZEB utilizzando il fotovoltaico integrato sfruttando la collaborazione tra il settore fotovoltaico (PV) e attori chiave del settore edile. Pertanto, la tecnologia BIPV è uno degli elementi chiave della politica europea sul clima e offre maggiori opportunità in termini di investimenti e quote di mercato. La capacità

produttiva installata annua di BIPV in tutto il mondo dovrebbe superare gli 11 GW entro il 2020, con un tasso di crescita annuale del 30%, spinto dalla crescente attenzione per le energie rinnovabili e dal movimento dell'edilizia verde nel settore delle costruzioni. Il mercato globale (secondo un rapporto di Global Industry Analysts) è dominato dall'Europa, che ha una quota di circa il 40%. L'Europa beneficia della più alta disponibilità di consumatori ad adottare pratiche ecologiche e rispettare i regolamenti sull'edilizia sostenibile, seguita da Nord America con il 27% delle installazioni annuali.

I nuovi prodotti che inglobano i moduli fotovoltaici in materiali da costruzione veri e propri, come le facciate continue, le finestre e le tegole dei tetti, sono disponibili da diversi sviluppatori nella catena di fornitura BIPV. Il vantaggio economico del fotovoltaico integrato rispetto ai più comuni sistemi non integrati è che il costo complessivo può essere compensato in parte sfruttando la stessa manodopera impiegata per i classici materiali da costruzione. Questo vantaggio rende i sistemi BIPV uno dei segmenti in più rapida crescita dell'industria fotovoltaica. Secondo un rapporto di ricerca di n-tech research pubblicato a febbraio 2017, il mercato totale dei BIPV dovrebbe aumentare da circa 3 miliardi di dollari nel 2015 a oltre 9 miliardi nel 2019 e salire a 26 miliardi nel 2022. Il settore dei vetri BIPV, come illustrato nel seguito, rappresenta per il 2018 un mercato da circa 2,1 miliardi di dollari mentre per il 2022 è stato stimato un giro di affari pari a 6,3 miliardi.

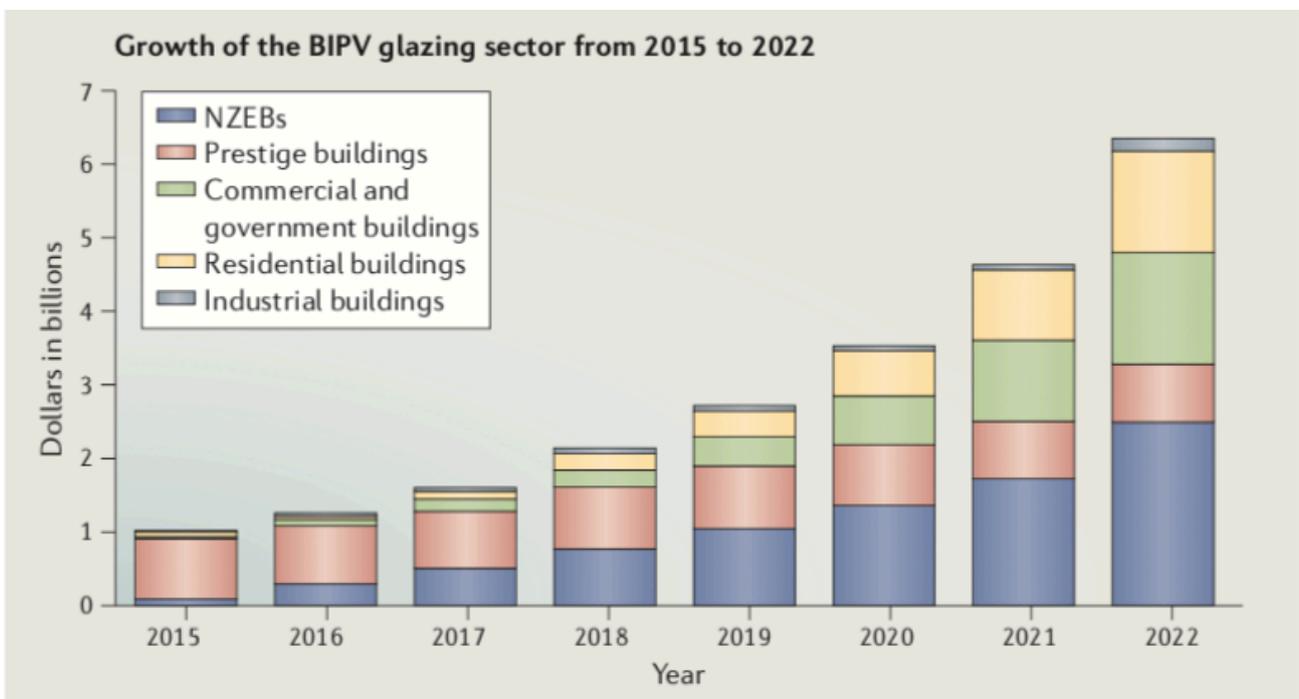


Figura 2.5 andamento mercato BIPV nello specifico caso dei vetri fotovoltaici (fonte: rivista Nature)

2.3. Criteri guida per la progettazione integrata

Un classico sistema fotovoltaico non integrato risulta ben pensato quando ottimizza bene i costi e le prestazioni energetiche. I parametri principali in questo caso sono riferiti al suo posizionamento, alla superficie di area utilizzata, alle caratteristiche elettriche e al tipo di tecnologia utilizzata. Nel caso di sistemi BIPV il contesto si amplia per via delle esigenze tecnologiche richieste dall'involucro edilizio e dal suo profilo architettonico.

Impianto fotovoltaico

Il generatore fotovoltaico è formato da un insieme di stringe di moduli fotovoltaici connesse elettricamente tra di loro. Le stringe sono costituite da più moduli collegati elettricamente in serie in modo da fornire la tensione richiesta. Più stringe, collegate generalmente in parallelo, costituiscono il generatore fotovoltaico. Il generatore fotovoltaico assieme al sistema di controllo e condizionamento della potenza (inverter) e ad altri dispositivi accessori di interfaccia con la rete o il sistema di accumulo costituiscono l'impianto fotovoltaico.

Nel caso di impianti con potenze significative le varie stringe saranno connesse tra di loro in parallelo e sempre in parallelo ai singoli moduli vengono installati dei diodi di by-pass (consentono di cortocircuitare e quindi isolare il singolo modulo nel caso di mal funzionamento) per limitare la brusca riduzione di potenza erogata dal modulo e/o dalla stringa che si manifesterebbe in sua assenza. In serie a ciascuna stringa invece vengono installati diodi di blocco che permettono di evitare in seguito ad ombreggiamento o a guasti che una stringa diventi passiva assorbendo e dissipando con danno la potenza elettrica prodotta dall'impianto.

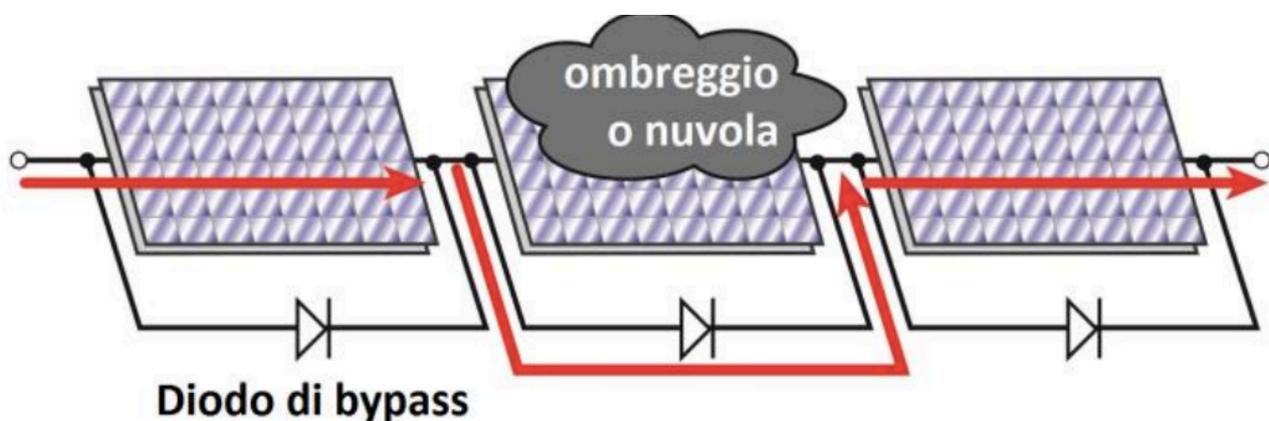


Figura 2.6 schema di funzionamento di un diodo bypass (fonte: www.asita.com)

2.3.1. Aspetti energetici

2.3.1.1. Posizionamento

la posizione di un modulo fotovoltaico è definita da due angoli principali:

- azimuth : distanza angolare misurata in gradi attorno all'orizzonte dell'osservatore partendo da sud (positivo verso ovest e negativo verso est)
- tilt: angolo relativo all'inclinazione del piano dei moduli rispetto al piano tangente la superficie terrestre.

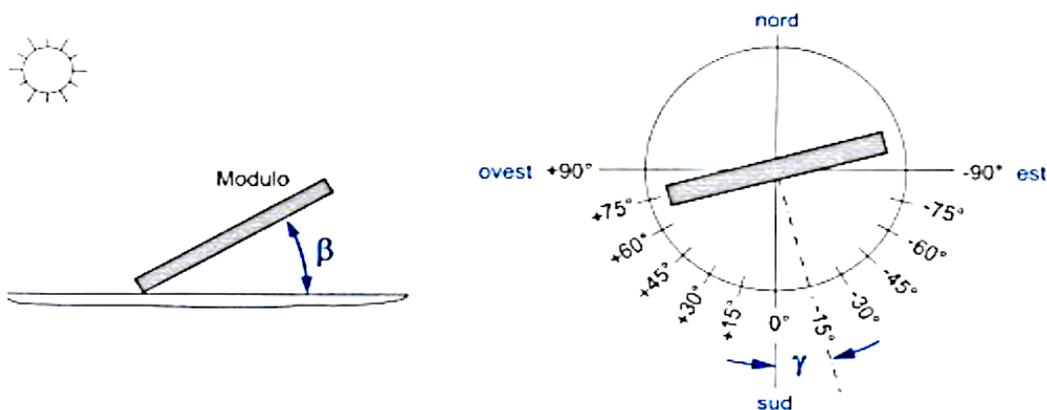
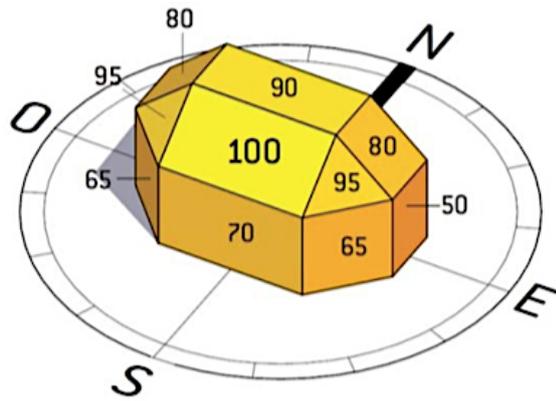


Figure 2.7 angolo di tilt a sinistra e azimuth a destra

La quantità di energia producibile dipende dall'efficienza del sistema in funzione della radiazione solare incidente (a sua volta funzione di parametri geografici e ambientali). L'energia prodotta varia quindi nei vari mesi in funzione della posizione del sole (azimuth ed elevazione). Nell'emisfero nord, a parità di orientamento, le superfici piane raggiungono la massima captazione nei mesi estivi (sole con elevazione massima) a discapito di quelle verticali che hanno una produzione minore. In linea di massima la posizione ottimale del sistema PV nell'emisfero boreale è costituita da un azimuth pari a 0° e un angolo di tilt dato dal valore della latitudine sottratto di 10° (per l'Italia circa 30°).

Se nel caso di un sistema fotovoltaico non integrato si sceglie sempre una posizione ottimale per massimizzare la resa energetica nel caso dei sistemi integrati bisognerà quasi sempre scendere a compromessi. Nel caso di un impianto integrato progettato su un edificio le forme, gli orientamenti e l'angolo di tilt sono già prestabiliti a priori e limitano quindi il rendimento energetico del sistema. Ecco perché sarebbe di buona norma per qualsiasi progettista conoscere a priori questi aspetti per tenerli in considerazione fin dalle prime fasi della progettazione e creare, nel caso di un edificio ex novo, già in partenza le condizioni più ottimali possibili per l'inserimento del sistema integrato. In ogni caso si può dire che scostamenti non eccessivi dai parametri di ottimizzazione energetica non comportano comunque una diminuzione energetica eccessiva.



INCLINAZIONE \ ORIENTAMENTO	INCLINAZIONE			
	0°	30°	60°	90°
Est	0,93	0,90	0,78	0,55
Sud-Est	0,93	0,96	0,88	0,66
Sud	0,93	1,00	0,91	0,68
Sud-Ovest	0,93	0,96	0,88	0,66
Ovest	0,93	0,90	0,78	0,55

Figure 2.8 schema grafico e relativa tabella del rendimento del sistema in base alla posizione (fonte: www.cittametropolitana.torino.it)

2.3.1.2. Fenomeni di ombreggiamento

Un buona progettazione deve mirare ad evitare l'ombreggiamento sia parziale che totale dei moduli poiché un'ombra anche solo se parziale riduce notevolmente il rendimento del modulo. Le ombre parziali provocano in un impianto perdite di potenza proporzionalmente molto più alte della singola superficie all'ombra. Nel caso di parziale ombreggiamento, le celle ombreggiate funzionano come dissipatori della potenza generata dal modulo innalzando bruscamente la propria temperatura. Il fenomeno è noto come "hot-spot" e può arrivare a temperature di oltre 100°C. Per ovviare a questo problema ed evitare il danneggiamento delle celle oscurate si installano i diodi di by-pass già citati in precedenza in merito alla definizione di impianto fotovoltaico in modo da deviare il flusso di corrente ed evitare che questa passi attraverso la cella o il modulo oscurato. Tecnicamente sarebbero necessari diodi di by-pass su ogni cella, ma nella pratica sono presenti su ogni stringa di celle.

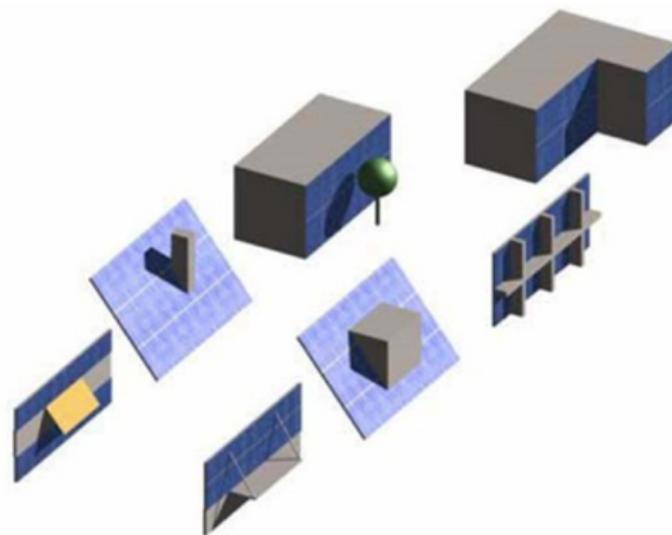


Figura 2.9 esempi di ombreggiamento (fonte: www.bipv.ch)

2.3.1.3. Ventilazione

In fase di progettazione è anche necessario pensare ad una buona ventilazione dell'impianto fotovoltaico soprattutto nel caso si volesse utilizzare la tecnologia al silicio cristallino (prima generazione) poiché una corretta ventilazione permette di mantenere bassa la temperatura dei moduli. È noto come all'aumentare della temperatura dei moduli corrisponda una diminuzione della potenza erogata dal sistema. Nei moduli al silicio cristallino la potenza viene ridotta di circa $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$ fino a $-0.5\%/^{\circ}\text{C}$. Anche per i moduli a film sottile si può pensare ad un discorso analogo ma più attenuato poiché la temperatura influenza meno la potenza. Nel silicio amorfo si ha un calo di circa $-0.1\%/^{\circ}\text{C}$ fino ad arrivare ad un massimo di $-0.2\%/^{\circ}\text{C}$. Per altre tecnologie a film sottile come il CIS e il CdTe si ha una variazione di efficienza di $-0.2\%/^{\circ}\text{C}$ fino ad un max di $-0.5\%/^{\circ}\text{C}$. Il comportamento termico della tecnologia in silicio amorfo risulta quindi quella meno influenzata dall'innalzamento della temperatura. La temperatura limite fino a cui non si riportano praticamente perdite di potenza si può fissare attorno ai 40°C . Nei sistemi non ventilati si può arrivare a perdite anche del 10%.

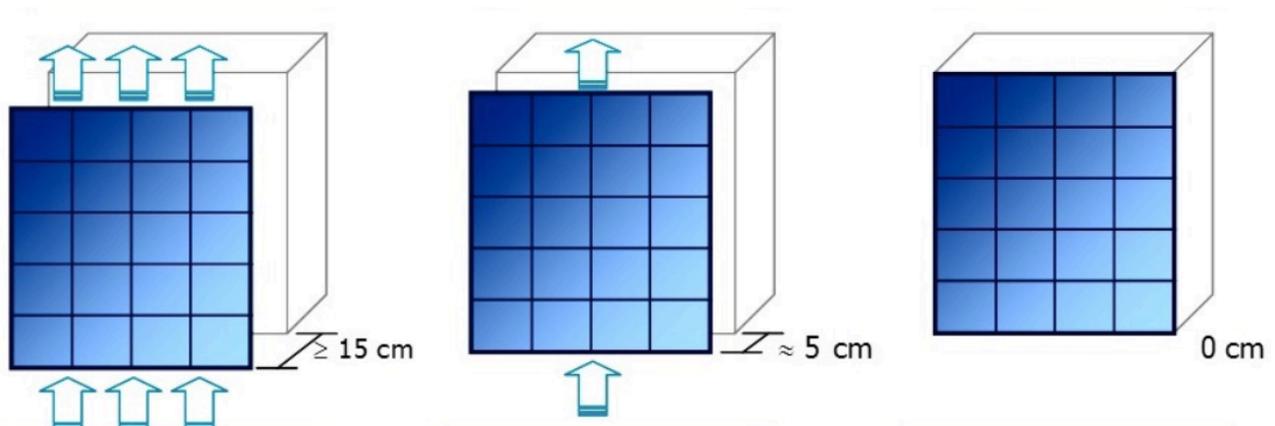


Figura 2.10 a partire da sinistra: facciata molto ventilata con perdite pari allo 0%, Facciata scarsamente ventilata con perdite del 5% e infine facciata non ventilata con perdite del 10% (fonte: www.bipv.ch)

2.3.2. Calcolo energia prodotta da un impianto fotovoltaico

Nel seguito vengono presentati tutti i punti principali per arrivare al calcolo finale dell'indice di produzione che rappresenta in definitiva la bontà di produzione dell'impianto fotovoltaico per kWp impiegato. I passaggi vengono estrapolati dalla brochure "Il fotovoltaico negli edifici" pubblicata dall'ISAAC (Istituto Sostenibilità Applicata all'Ambiente Costruito), nonché dipartimento della SUPSI (Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana).

Condizioni di irraggiamento

Per valutare la produzione di un impianto solare bisogna conoscere l'irraggiamento su un dato luogo, cioè il flusso di energia solare incidente su una superficie data per unità di tempo (W/m^2).

Solitamente viene fornita dai diversi portali l'irradiazione solare incidente su una superficie piana.

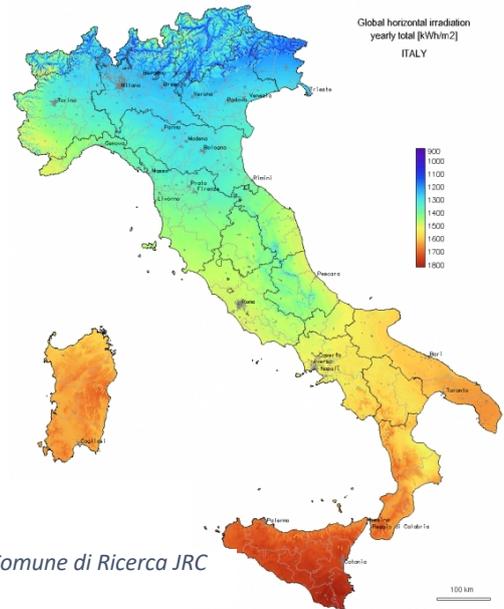


Figura 2.11 fonte: Centro Comune di Ricerca JRC

Fattori di conversione

Il tasso di irraggiamento solare annuo sul piano orizzontale va successivamente ponderato considerando l'inclinazione del modulo PV e il suo orientamento. Per eseguire questo passaggio vengono forniti dei valori di trasposizione che rappresentano il rapporto tra l'energia solare incidente annualmente su di un piano orizzontale e quella incidente su di un piano con diversa inclinazione e orientamento. Di sotto vengono mostrati i fattori di trasposizione per latitudini del nord Italia

		Orientamento												
		-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Inclinazione	90°	0.54	0.60	0.66	0.71	0.75	0.78	0.80	0.80	0.78	0.75	0.70	0.64	0.58
	80°	0.61	0.68	0.74	0.80	0.85	0.89	0.91	0.90	0.88	0.84	0.79	0.72	0.65
	70°	0.68	0.75	0.82	0.89	0.94	0.98	1.00	1.00	0.97	0.93	0.87	0.80	0.72
	60°	0.75	0.82	0.90	0.96	1.01	1.05	1.07	1.07	1.04	1.00	0.94	0.86	0.78
	50°	0.81	0.88	0.95	1.02	1.07	1.10	1.12	1.12	1.09	1.05	0.99	0.92	0.84
	40°	0.87	0.94	1.00	1.05	1.10	1.13	1.15	1.14	1.12	1.08	1.03	0.97	0.90
	30°	0.92	0.97	1.03	1.07	1.11	1.13	1.15	1.14	1.13	1.09	1.05	1.00	0.94
	20°	0.96	1.00	1.04	1.07	1.09	1.11	1.12	1.12	1.11	1.08	1.05	1.02	0.98
	10°	0.99	1.01	1.03	1.04	1.06	1.07	1.07	1.07	1.06	1.05	1.04	1.02	1.00
	0°	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Ottimizzazione dell'impianto tramite orientamento e inclinazione

Una buona progettazione dovrà prima di tutto considerare gli aspetti di orientamento e inclinazione dell'impianto stesso, negli edifici che offrono soluzioni vincolate sarà fondamentale per il calcolo dell'energia producibile sapere quanta perdita si ha in funzione della posizione dell'impianto.

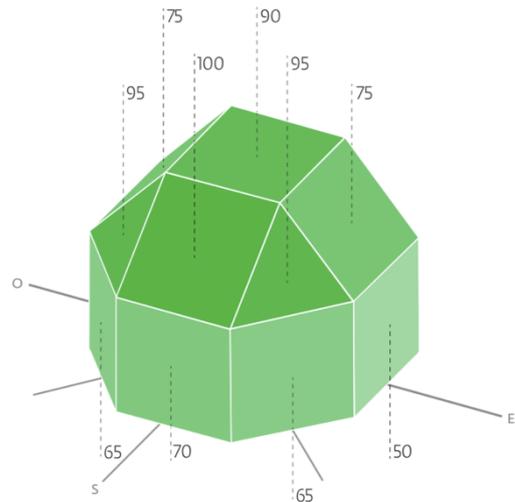


Figura 2.12 fonte: ISAAC

Quantificazione della superficie a disposizione

Il rendimento indica in percentuale quanta energia solare ricevuta viene trasformata effettivamente in elettricità. Questo parametro non è per forza indice di qualità migliore o peggiore ma semplicemente offre un'indicazione di quanta superficie dovrà essere impiegata per un determinata potenza di picco.

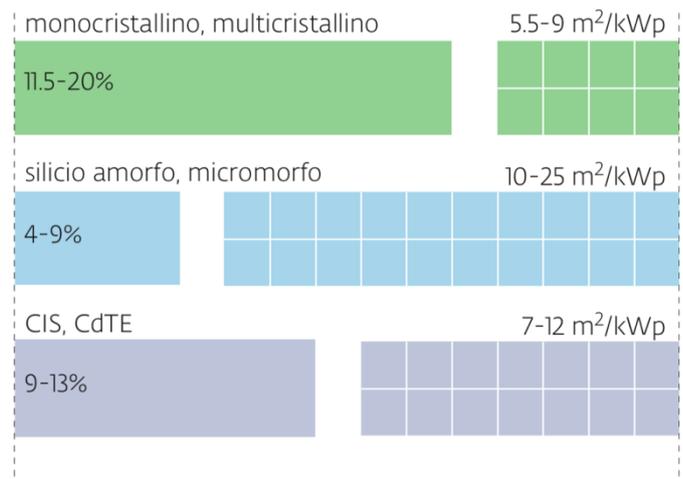


Figura 2.13 fonte: ISAAC

Efficienza dei moduli

L'efficienza dei moduli è comunque fondamentale per capire quanta energia solare viene effettivamente trasformata in corrente elettrica. Di seguito viene mostrato un grafico che riporta un range medio dell'efficienza delle varie tecnologie

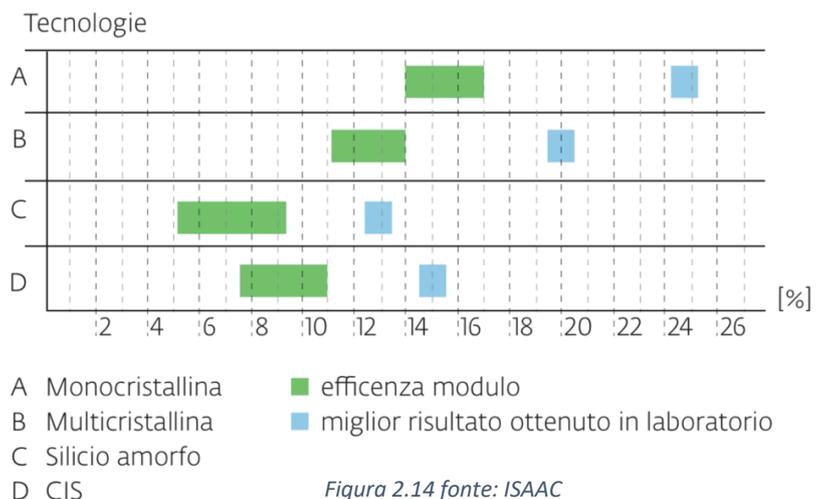


Figura 2.14 fonte: ISAAC

Perdite del sistema (Performance Ratio)

Il Performance Ratio (PR) esprime in percentuale il rapporto tra il rendimento effettivo e il rendimento teorico dell'impianto fotovoltaico. Indica la % di energia realmente prodotta e non si potrà mai avere un valore del 100% poiché le perdite nell'impianto sono comunque inevitabili, si possono solo ridurre con l'introduzione di nuova componentistica di moderna fatturazione. Di solito si hanno comunque Performance Ratio superiori dell'80%.

Riflessione del vetro	2-4%
Digressione dalle STC	2-4%
Coefficiente di temperatura	3-6%
Neve, polvere, sporcizia	1-2%
Ombre	≥0%
Tolleranza e mismatching	2%
Inverter	≥5%
Cablaggio	1-2%

Indice di produzione

Indica il rapporto tra l'energia utilizzabile prodotta da un impianto in un dato periodo e la potenza nominale dell'impianto stesso. l'indice si misura in [kWh/kWp]. Nel seguito viene proposto un esempio di calcolo dell'indice di produzione.

Tecnologia	monocristallina [7m ² /kWp]
Superficie netta disposizione	30 m ²
Potenza impianto	30/7=4.3 kWp
Orientamento moduli	sud (azimuth 0°)
Inclinazione moduli	20°

Bellinzona: Irraggiamento solare globale sul piano orizzontale	1'218 [kWh/m ²]
Fattore di conversione	1.12
Efficienza dei moduli	moduli monocristallini 17%
Performance Ratio	standard 80%

$$\text{Energia prodotta in un anno [kWh/a]} = \text{irraggiamento} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}} \right] \cdot \text{fattore di conversione [\%]} \cdot \text{area [m}^2] \cdot \text{efficienza del modulo [\%]} \cdot \text{PR [\%]}$$

$$5'566 \text{ [kWh]} = 1'218 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}} \right] \cdot 1.12 [\%] \cdot 30 \text{ [m}^2] \cdot 0.17 [\%] \cdot 0.80 [\%]$$

$$\text{Indice di produzione} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kWp}} \right] = \frac{\text{energia prodotta [kWh]}}{\text{potenza dell'impatto [kWp]}} \quad \frac{5'566 \text{ [kWh]}}{4.3 \text{ [kWp]}} = 1294 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kWp}} \right]$$

2.4. Esempi di applicazioni BIPV

Pannelli convenzionali al silicio cristallino su coperture

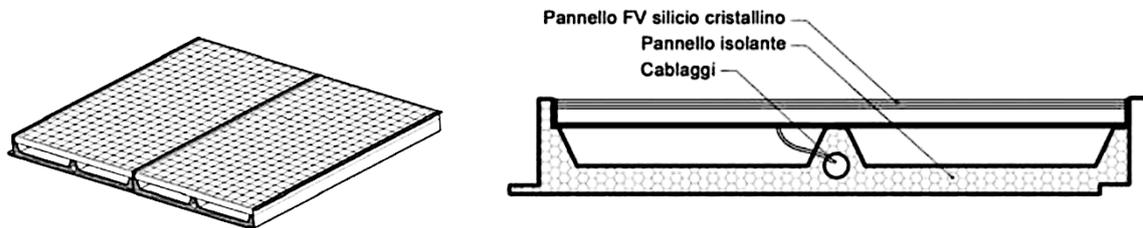


Figure 2.15 vista 3D e stratigrafia di esempio del sistema (fonte: rivista Ponte)



Figure 2.16 pannelli al silicio cristallino su coperture metalliche di capannoni industriali (fonte: www.alubel.com)



Figura 2.17 pannelli su coperture metalliche di edifici residenziali (fonte: EnergyGlass)

In questo caso è ancora improprio parlare di sistema BIPV poiché l'impianto fotovoltaico non sostituisce un componente edilizio ma si appoggia solamente su di esso, si parla quindi ancora di sistemi BAPV (Building Applied Photovoltaics). Tuttavia questa particolare soluzione mostra come un sistema non per forza integrato possa comunque interagire meglio con l'architettura dell'edificio.

Rivestimento impermeabile a film sottile

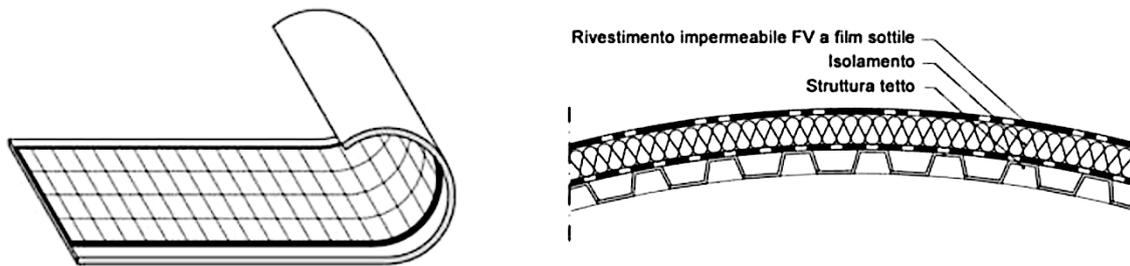


Figure 2.18 vista 3D e stratigrafia di esempio del sistema (fonte: rivista Ponte)

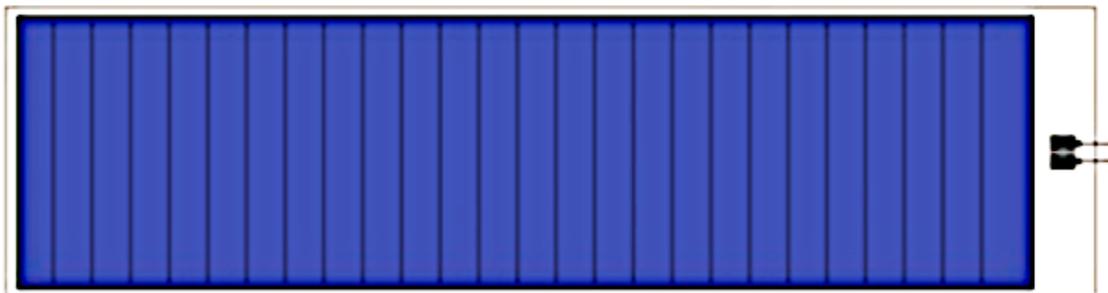


Figure 2.19 esempio di applicazione e schema del modulo fotovoltaico a film sottile (fonte: scheda tecnica General Membrane)

In questo esempio si vede una soluzione fotovoltaica flessibile a film sottile realizzata da General Membrane denominata General Solar PV che come obiettivo, oltre che al fondamentale concetto di catturare l'energia solare, vuole anche impermeabilizzare la copertura stessa. Il prodotto è certificato ai sensi delle normative tecniche CEI EN 61646 e CEI EN 61730. Il sistema è composto da uno strato impermeabile bituminoso al quale viene accoppiato in situ il laminato fotovoltaico flessibile. Nel caso di coperture esistenti già impermeabilizzate è necessario posare uno strato di membrana bituminosa extra in totale aderenza alla copertura come strato di accoglimento del laminato fotovoltaico flessibile. Il sistema General SOLAR PV utilizza celle solari a film sottile in CIGS.

Fotovoltaico a film sottile su copertura metallica

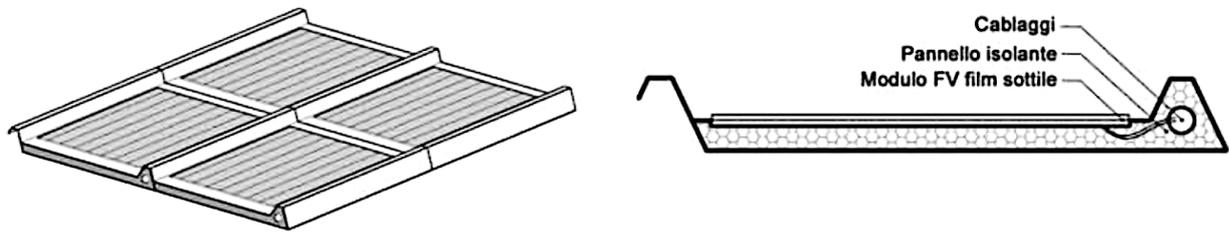


Figure 2.20 vista 3D e stratigrafia di esempio del sistema (fonte: rivista Ponte)



Figure 2.21 esempio di installazione a Coredo (fonte: www.edilportale.com)

Polo scolastico di Coredo (TN) realizzato nel 2011 basato sul concetto del risparmio energetico e dell'elevata efficienza. In copertura si trovano dei sistemi fortemente innovativi che includono un impianto fotovoltaico a film sottile PREFA perfettamente integrato nel rivestimento PREFALZ. Come si può notare dalle immagini sopra riportate l'impianto fotovoltaico si adatta perfettamente alle forme del tetto.

Fotovoltaico al silicio cristallino integrato in facciata

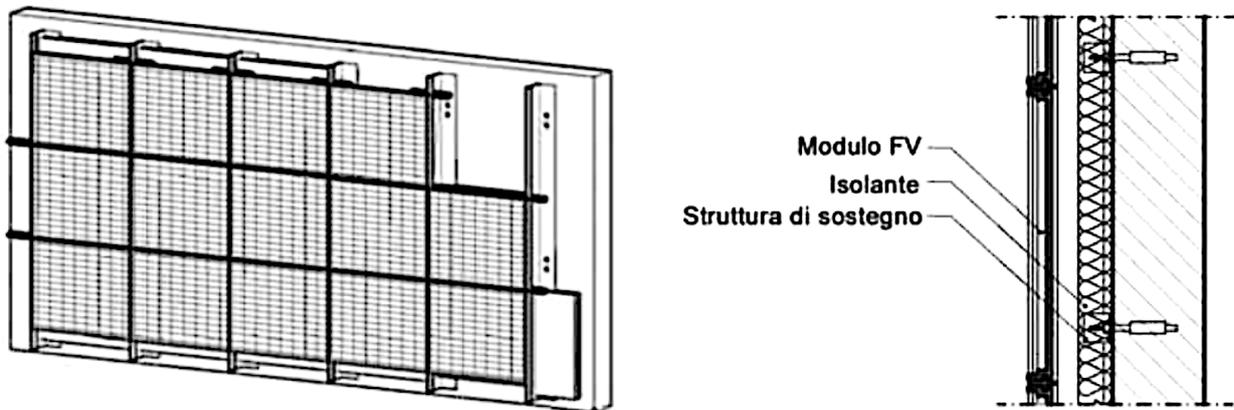


Figure 2.22 vista 3D e stratigrafia di esempio del sistema (fonte: rivista Ponte)



Figura 2.23 Manchester College of Arts and Technology
(fonte: www.solarcentury.com)



Figura 2.24 Zara fashion store, Colonia, Germania
(fonte: www.pvdatabase.org)

Nel caso di soluzioni come quelle sopra illustrate (facciata del Manchester College of Arts and Technology e facciata dello Zara Fashion store) uno dei parametri più importanti è quello di realizzare un corretto sistema di ventilazione per consentire di non surriscaldare troppo il sistema in facciata, come già discusso in precedenza il fotovoltaico al silicio cristallino è influenzato dalla temperatura (vedere sottocapitolo 2.3.1.3. sulla ventilazione)

Fotovoltaico al silicio cristallino integrato in pannelli di vetro

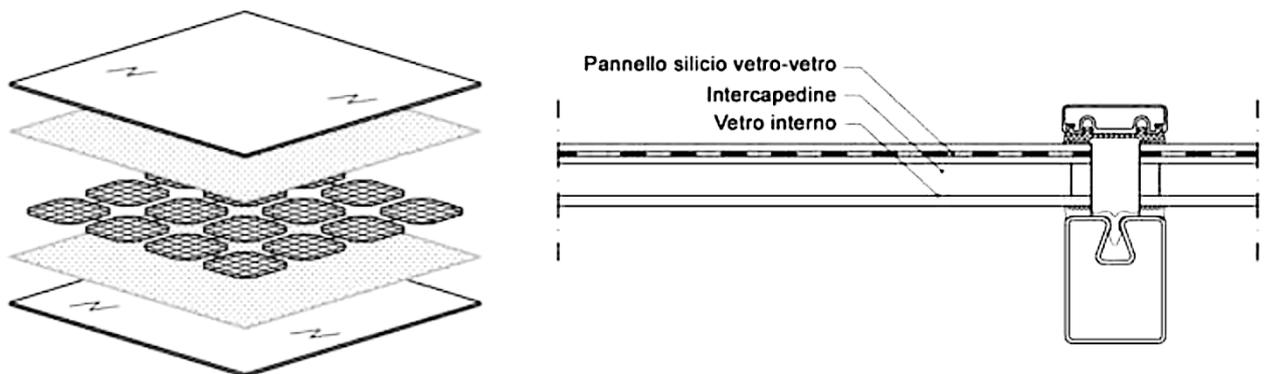


Figure 2.25 vista 3D e stratigrafia di esempio del sistema (fonte: rivista Ponte)



Figure 2.26 esempi di soluzioni progettuali integrate in pannelli di vetro (fonte: EnergGlass)

Le applicazioni del vetro strutturale fotovoltaico sono praticamente infinite, ogni sistema si presta estremamente bene a questo tipo di integrazione poiché di per se il vetro è un prodotto estremamente versatile in edilizia. Motivo per cui si possono trovare applicazioni di ogni genere per questa tipologia di sistema come ad esempio barriere frangisole, facciate in vetro strutturale, coperture, tettoie, finestre fino ad arrivare anche ai sistemi anticaduta.

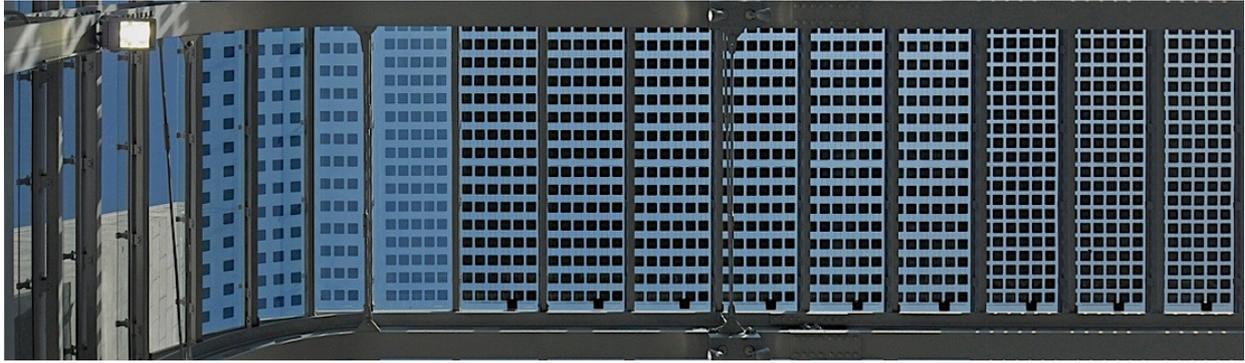


Figura 2.27 vista dall'interno della copertura della stazione Porta Susa a Torino (fonte: Energy Glass)

Nella figura 2.27 viene mostrata una vista dal basso della copertura di Porta Susa a Torino in cui si vedono diversi pannelli fotovoltaici con diversi gradi di densità delle celle fotovoltaiche. Uno dei principali vantaggi dei sistemi fotovoltaici al silicio cristallino inglobati in componenti vetrati e proprio quello di poter decidere il grado di intensità delle celle, si possono quindi realizzare componenti vetrati molto fitti per avere sistemi in grado di ombreggiare in maniera efficace la struttura o meno fitti per permettere un più alto grado di illuminazione. In questo esempio si può notare come i componenti siano molto fitti nella zona centrale della copertura e come man mano scendano di intensità andando verso l'estremità della copertura stessa fino ad arrivare agli ultimi componenti totalmente privi di celle cristalline. Si può inoltre decidere di "giocare" con altri parametri come il grado di trasparenza della cella stessa per ottenere sempre i valori di illuminamento necessari a patto di perdere però una percentuale sull'efficienza energetica (la cella più trasparente ha un rendimento inferiore).



Figure 2.28 esempio di facciata a doppia pelle con all'esterno inglobate celle al silicio monocristallino (fonte: www.bipv.ch)

Nelle figure 2.28 viene riportato un esempio di edificio a doppia pelle che integra al suo esterno celle al silicio monocristallino situato a Digione in Francia. L'obiettivo principale del progetto di riqualificazione di questo edificio era proprio il retrofit energetico.

Fotovoltaico a film sottile integrato in pannelli di vetro

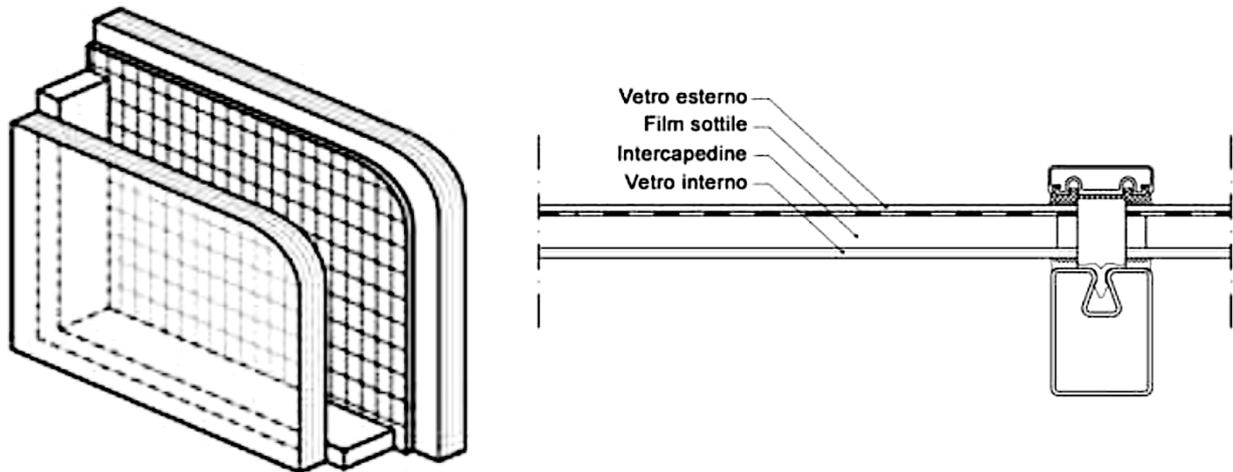


Figure 2.29 vista 3D e stratigrafia di esempio (fonte: rivista ponte)

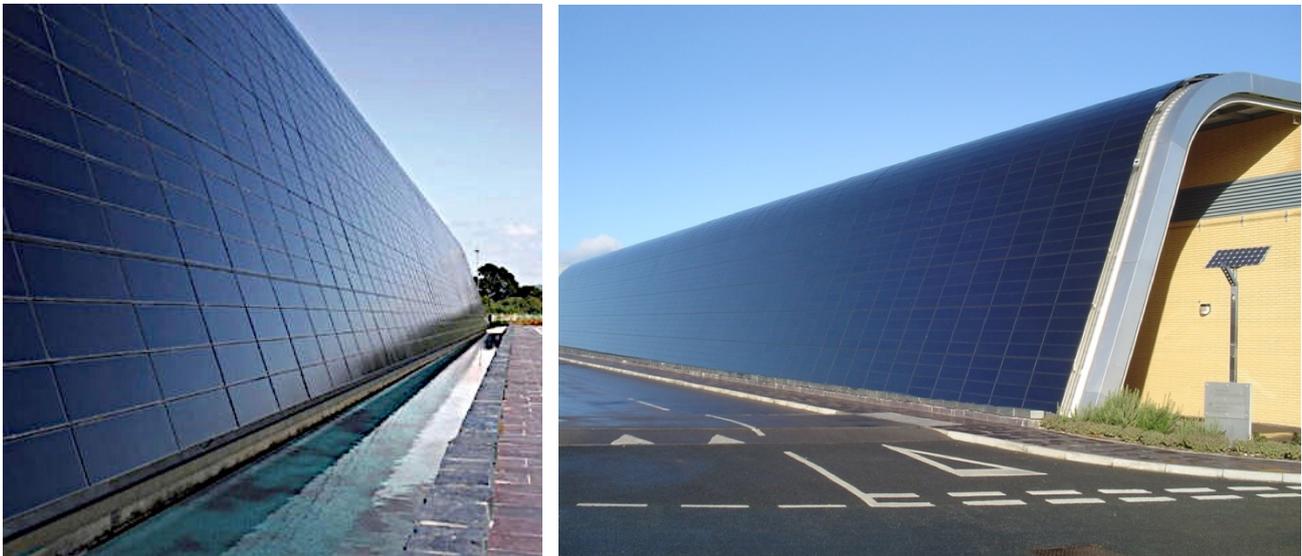


Figure 2.30 Opto-electronics Technology and Incubation Centre, St Asaph, Regno Unito (fonte: www.pvdatabase.org)

Fotovoltaico a film sottile integrato nella facciata del Technium OpTIC (Opto-electronics Technology and Incubation Centre) a St Asaph nel Regno Unito. Il sistema fotovoltaico è stato utilizzato per creare un imponente “muro solare” inclinato di circa 70° con una curvatura finale sulla linea del tetto. Il sistema, nella parte inferiore, termina in una piscina ornamentale che raccoglie anche il deflusso delle acque piovane. Il sistema ha una potenza di picco pari a 85 kWp per un’area totale di circa 1200 m². Sono stati utilizzati 2400 pannelli con dimensioni di 140 cm x 35 cm.

Tegole fotovoltaiche

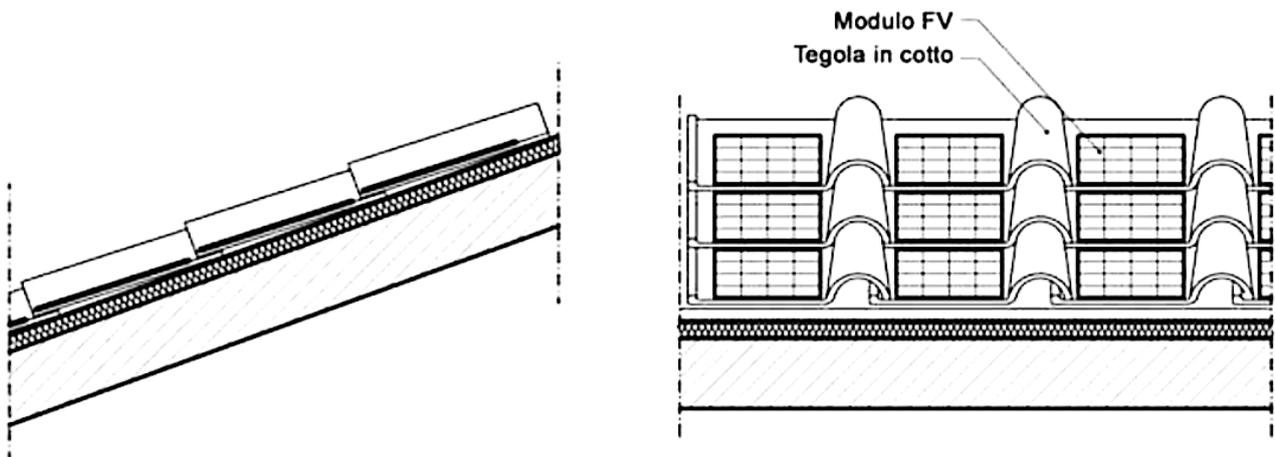


Figure 2.31 vista 3D e stratigrafia di esempio del sistema (fonte: rivista Ponte)



Figure 2.32 esempio di coppo fotovoltaico (Fonte: cottopossagno.com)



Figure 2.33 esempio di tegola fotovoltaica (fonte: Fornace Fonti srl)

In Italia circa il 40% del territorio è sottoposto a vincoli storico-paesaggistici, in queste zone non è sempre possibile posizionare i classici pannelli fotovoltaici non integrati, mentre le tegole fotovoltaiche possono essere installate in quanto si uniformano ed integrano perfettamente con l'edificio. Forme e materiali si amalgamano a quelle preesistenti risultando praticamente invisibili dal resto del tetto. Il caso dell'edilizia storica viene trattato nello specifico nel successivo sottocapitolo.

2.5. Fotovoltaico integrato nell'edilizia storica

2.5.1. Analisi dei vincoli architettonici e paesaggistici

Un caso particolare che merita di essere approfondito a parte è quello del fotovoltaico inserito all'interno dell'edilizia storica in quanto bisogna prestare particolare attenzione alla presenza di vincoli ai sensi del Dlgs 22 gennaio 2004, n. 42 (Codice dei beni culturali e del paesaggio). Gli interventi su beni architettonici o paesaggistici qualora non presentino le prescritte autorizzazioni possono comportare per il trasgressore sanzioni amministrative e penali nonché l'obbligo di ripristinare lo stato dei luoghi. Tutti questi beni sono considerati parte del patrimonio culturale e per tale motivo ne va garantita la protezione, la conservazione e la valorizzazione. La Repubblica Italiana, tramite art. 9 della Costituzione, tutela e valorizza il paesaggio e il patrimonio storico e artistico secondo quanto disposto del Dlgs n.42/2004.

Nel codice vengono individuati due tipologie di beni costituenti il patrimonio culturale:

- beni architettonici (tutelati nella parte seconda del codice)
- beni paesaggistici (tutelati nella parte terza del codice)

2.5.1.1. Beni architettonici

Vengono considerati tali tutti i beni culturali immobili che presentano interesse storico ed artistico. Possono rientrare in questa categoria anche parchi, piazze, vie e architetture rurali.

Interventi soggetti ad autorizzazione:

- **Beni pubblici**

vengono considerati tali opere con più di 70 anni di vita realizzate da autori non più viventi fino a quando non venga verificato l'interesse culturale da parte degli organi del ministero.

- **Beni privati**

sono esclusi tutti i beni con meno di 70 anni e realizzati da autore ancora vivente. l'autorizzazione preventiva è necessaria nel caso esista una specifica dichiarazione di interesse culturale che viene emessa dal soprintendente anche su motivata richiesta da parte della regione o di altri enti territoriali. Le eventuali dichiarazioni vengono comunicate al proprietario del bene. Tutti i beni di interesse culturale sono inseriti in un apposito elenco. È bene ricordare che anche nel caso non fossero presenti vincoli specifici su un dato bene al soprintendente spetta la facoltà di ordinare la modifica o la sospensione degli interventi .

2.5.1.2. Beni paesaggistici

Sono numerosi i beni paesaggistici che possono essere oggetto di attività edilizia tra cui rientrano ad esempio i complessi di beni immobili con un tipico valore estetico e tradizionale inclusi i centri e i nuclei storici. Troviamo anche tutta una serie di territori collocati in particolari zone tra cui quelle costiere e quelle attorno a laghi (fascia di protezione per entrambe di 300 m) mentre per alcuni fiumi esistono vincoli fino a 150 m da essi. Esistono inoltre altri beni sottoposti a tutela da piani paesaggistici regionali. In Italia si ha una maggiore diffusione dei vincoli paesaggistici rispetto a quelli architettonici poiché quest'ultimi sono appunto vincoli puntuali mentre i primi possono occupare anche estese aree del territorio. In presenza di vincolo paesaggistico, a patto di non alterare lo stato dei luoghi e l'aspetto esteriore degli edifici, non occorre richiedere l'autorizzazione su interventi di:

- manutenzione ordinaria
- manutenzione straordinaria
- consolidamento statico
- restauro conservativo

2.5.1.3. Autorizzazione paesaggistica

L'autorizzazione paesaggistica viene regolamentata dal Codice dei Beni Culturali (Dlgs 42/2004) ed è obbligatoria per interventi in zone soggette a tutela paesaggistica come ad esempio quelle prima citate e va richiesta all'ente competente in modo da accettare la compatibilità paesaggistica dell'intervento. A seconda dell'intervento si può ricorrere a tre procedure diverse:

- **intervento libero:** nessun obbligo di autorizzazione paesaggistica
- **autorizzazione paesaggistica semplificata:** iter procedurale abbreviato
- **autorizzazione paesaggistica ordinaria:** interventi significativi e iter procedurale più lungo

Il DPR 31/2017 ridefinisce la procedure per il rilascio dell'autorizzazione paesaggistica semplificata, amplia le attività degli interventi liberi e riduce l'iter procedurale grazie a nuovi modelli unificati per la presentazione delle istanze. Non viene però introdotta nessuna novità sul fronte dell'autorizzazione paesaggistica ordinaria.

Intervento libero

Il DPR 31/2017 fa rientrare in questa categoria lavori che nel vecchio DPR 139/2010 (ora abrogato) rientravano nella procedura semplificata come ad esempio l'inserimento di elementi amovibili e l'installazione di tende, pedane, elementi ombreggianti, poste a corredo di attività economiche o turistico-ricettive. Per quanto riguarda gli impianti fotovoltaici viene nel seguito riproposta la parte del testo contenuta all'interno del DPR 31/2017 nell'allegato A riferito proprio agli interventi in aree vincolate esclusi dall'autorizzazione paesaggistica:

“A.6. installazione di pannelli solari (termici o fotovoltaici) a servizio di singoli edifici, laddove posti su coperture piane e in modo da non essere visibili dagli spazi pubblici esterni; installazione di pannelli solari (termici o fotovoltaici) a servizio di singoli edifici, purché integrati nella configurazione delle coperture, o posti in aderenza ai tetti degli edifici con la stessa inclinazione e lo stesso orientamento della falda degli edifici, ai sensi dell'art. 7-bis del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28, non ricadenti fra quelli di cui all'art. 136, comma 1, lettere b) e c), del decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42; “

Nel seguito, per una maggiore comprensione, viene anche riproposto l'art. 136 del decreto legislativo del 22 gennaio 2004, n. 42 riferito agli immobili ed aree di notevole interesse pubblico:

“1. Sono soggetti alle disposizioni di questo Titolo per il loro notevole interesse pubblico:

a) le cose immobili che hanno cospicui caratteri di bellezza naturale o di singolarità geologica;

b) le ville, i giardini e i parchi, non tutelati dalle disposizioni della Parte seconda del presente codice, che si distinguono per la loro non comune bellezza;

c) i complessi di cose immobili che compongono un caratteristico aspetto avente valore estetico e tradizionale;

d) le bellezze panoramiche considerate come quadri e così pure quei punti di vista o di belvedere, accessibili al pubblico, dai quali si goda lo spettacolo di quelle bellezze.”

Autorizzazione paesaggistica semplificata

Il DPR 31/2017 amplia gli interventi soggetti ad una procedura di autorizzazione semplificata e modifica l'iter procedurale per l'ottenimento dell'autorizzazione prevedendo l'invio dei documenti solo per via telematica. Nel seguito viene riproposto quanto descritto nell'allegato B del decreto DPR 31/2017 riferito agli interventi di lieve entità soggetti al procedimento di autorizzazione semplificata in merito agli impianti fotovoltaici:

“B.4. interventi sulle coperture, diversi da quelli di cui alla voce B.2, comportanti alterazione dell'aspetto esteriore degli edifici mediante modifica delle caratteristiche architettoniche, morfotipologiche, dei materiali o delle finiture esistenti, quali: rifacimento del manto del tetto con materiali diversi; modifiche alle coperture finalizzate all'installazione di impianti tecnologici; modifiche alla inclinazione o alla configurazione delle falde; realizzazione di lastrici solari o terrazze a tasca; inserimento di canne fumarie o comignoli; realizzazione di finestre a tetto, lucernari, abbaini o elementi consimili.”

“B.8. installazione di pannelli solari (termici o fotovoltaici) a servizio di singoli edifici, purché integrati nella configurazione delle coperture, o posti in aderenza ai tetti degli edifici con la stessa inclinazione e lo stesso orientamento della falda degli edifici ricadenti fra quelli di cui all'art. 136, comma 1, lettere b) e c), del decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42; installazione di pannelli solari (termici o fotovoltaici) a servizio di singoli edifici su coperture piane in posizioni visibili dagli spazi pubblici esterni.”

Autorizzazione paesaggistica ordinaria

L'autorizzazione paesaggistica ordinaria va richiesta in tutti quei casi non compresi tra gli interventi liberi o quelli sottoposti ad iter semplificato. L'iter per l'ottenimento del nullaosta in questo caso è più lungo rispetto alla procedura semplificata: dopo aver presentato la domanda, l'Amministrazione competente svolge le verifiche e gli accertamenti ritenuti necessari acquisendo il parere della locale commissione per la qualità architettonica e il paesaggio. Successivamente, entro 40 giorni dalla data di ricezione della domanda, trasmette alla competente soprintendenza la proposta di autorizzazione paesaggistica corredata dagli elaborati tecnici dandone contestualmente comunicazione al soggetto interessato. La Soprintendenza verifica la completezza e la corrispondenza della documentazione inoltrata qualora ritenesse insufficiente quanto trasmesso, ha facoltà di richiedere integrazioni, sospendendo i termini del procedimento. Il Soprintendente comunica il parere di competenza entro il termine perentorio di 45 giorni dalla data di ricezione della proposta decorsi i quali, in assenza di parere espresso, viene indetta una conferenza dei servizi, prolungando i termini del procedimento di ulteriori 15 giorni. Entro 20 giorni dalla ricezione del parere della soprintendenza, l'amministrazione rilascia l'autorizzazione.

2.5.2. Linee guida MIBAC

Le “Linee guida di indirizzo per il miglioramento dell’efficienza energetica nel patrimonio culturale dell’Architettura, dei Centri e nuclei storici e urbani” sono state elaborate nel 2015 dal MIBAC (Ministero per i Beni e le Attività Culturali) e rappresentano un utile strumento per orientare gli interventi di miglioramento energetico del patrimonio culturale costruito. Le Linee guida MIBAC non espongono metodologie vincolanti, ma offrono indicazioni di base per il miglioramento energetico del patrimonio tutelato nell’ottica di una strategia di contenimento dei consumi energetici offrendo al tempo stesso una valorizzazione e conservazione del patrimonio storico.

Le Linee guida MIBAC sono sostanzialmente suddivise in tre parti:

- Conoscenza dei contesti (di cui si è già parlato nei paragrafi sopra riportati)
- Valutazione dell’efficienza energetica per il patrimonio culturale
- Miglioramento dell’efficienza energetica per il patrimonio culturale

Principalmente lo scopo delle linee guida MIBAC è quello di fornire anche tramite una ricca sequenza di schede tecniche di diversi materiali metodologie di intervento al fine di migliorare le prestazioni energetiche dell’edificio considerato e il confort interno, una parte viene però dedicata all’inserimento delle fonti rinnovabili nel patrimonio storico.

2.5.2.1. Il fotovoltaico nelle linee guida MIBAC

Leggendo la sezione dedicata all’inserimento degli impianti fotovoltaici all’interno dell’edilizia storica si nota come tendenzialmente venga proposto il dislocamento di tale tecnologia in altri siti ma nonostante ciò viene comunque apprezzata una buona integrazione architettonica che permetta di armonizzare il più possibile la tecnologia fotovoltaica con il contesto storico.

Linee guida da seguire per l’inserimento dei pannelli sulle coperture dell’edilizia storica secondo quanto prescritto dal MIBAC:

- utilizzo di soluzioni integrate in copertura
- disposizione dei pannelli in una striscia continua, al di sopra della linea di gronda, su tutta la lunghezza del tetto, o eventualmente a copertura dell’intera falda che presenta la migliore esposizione (la superficie di pannelli risulta in questo modo meno invasiva rispetto alla frammentazione visiva della falda)
- scelta di soluzioni cromatiche compatibili per la superficie dei pannelli, nel caso di inserimenti sulle coperture (grigio dell’ardesia, rosso mattone dei coppi ecc.)

2.5.3. Esempi di soluzioni progettuali nell'edilizia storica

Nel seguito verranno proposte una serie di soluzioni progettuali che mirano a risolvere in maniera intelligente il conflitto che spesso si crea tra la conservazione del patrimonio storico da una parte e del risparmio energetico dall'altra. Si potrà facilmente notare come una corretta progettazione di un sistema BIPV può convivere in maniera più che appropriata con un contesto urbano vincolato. Alcuni di questi esempi vengono direttamente estrapolati dalle linee guida del MIBAC che vogliono in primis mostrare come soluzioni innovative, ben progettate e integrate all'interno di un manufatto storico possano essere non solo possibili, ma anche in grado di creare un gradevole impatto estetico senza alterare in maniera invasiva la storicità dell'edificio o in alcuni casi essere anche totalmente invisibili all'utenza.

Fotovoltaico inserito in vetrate



Figura 2.34 fonte: Linee guida MIBAC



Figura 2.35 fonte: www.meilleursagents.com

Localizzazione: 170 Rue Raymond Losserand , Parigi.
Edificio: Ex sede della Compagnie parisienne de distribution d'électricité convertito in centro polifunzionale (edificio dei primi del novecento)
Tecnologia: silicio policristallino
Inizio dei lavori: 2009



Figura 2.36 dettaglio di una porta finestra e vista dall'interno (fonte: www.polis-solar.eu)

Fotovoltaico inserito su prospetti di edifici storici



Figure 2.37 fonte: Linee guida MIBAC

Localizzazione: La Spezia, Italia

Edificio: Museo civico archeologico Ubaldo Formentini

Pannello di segnalazione con tecnologia fotovoltaica mascherata, parte del progetto pvaccept

Tecnologia: Dispositivi fotovoltaici a rivestimento semitrasparente perforato

Anno di realizzazione: 2004

Fotovoltaico inserito in zone ad alto vincolo paesaggistico



Figure 2.38 fonte: Eurosolar Italia

Localizzazione: Città del Vaticano

Edificio: auditorium "Aula Paolo VI" realizzato da Pier Luigi Nervi e inaugurato nel 1971.

Anno di realizzazione impianto: 2008

Tecnologia: Silicio monocristallino

Descrizione: impianto PV integrato sulla copertura costituito da 2400 moduli in silicio cristallino della Solar World con una potenza di picco complessiva pari a 221 kWp (fino a 300 MWh di elettricità all'anno). La nuova struttura rispecchia il progetto originale dell'architetto Nervi dove sono state sostituite le 4800 tegole in cemento (molto degradate). L'impianto segue la forma a ventaglio dell'edificio in modo da non alterare il progetto originale. Sono stati anche collocati degli specchi per aumentare la radiazione solare incidente sui pannelli PV.

Fotovoltaico inserito su chiese



Figure 2.39 fonte: sito web del comune di Manspach



Localizzazione: Manspach, Alsazia, Francia.

Tecnologia: pannelli in silicio monocristallino

Edificio: Chiesa cattolica

Anno di realizzazione: 2015

Descrizione: La copertura della chiesa è stata rifatta utilizzando tegole fotovoltaiche diventando di fatto la prima chiesa fotovoltaica in Europa. Le tegole utilizzate riproducono perfettamente la copertura tradizionale alsaziana in ardesia, sia nel colore che nella posa a losanghe, evitando di snaturare l'estetica dell'edificio sacro e integrandolo perfettamente al suo contesto naturale. Le 462 tegole fotovoltaiche posate sulle due falde della navata con estensione di circa 350 m² producono una media di 30.000 kWh all'anno pari al fabbisogno della chiesa stessa e di altre 9 abitazioni. L'elettricità prodotta in eccesso viene immessa nella rete elettrica e venduta al gestore locale.

3. Fotovoltaico innovativo per l'integrazione architettonica

Attualmente gli impianti fotovoltaici maggiormente utilizzati nel mondo risultano essere costituiti dalle ormai sempre più consolidate tecnologie già illustrate in precedenza (si veda il capitolo 1).

Il fotovoltaico di prima generazione, ovvero quello che impiega pannelli basati sul silicio monocristallino e policristallino, resta ancora il più largamente diffuso mentre al secondo posto troviamo il fotovoltaico di seconda generazione che impiega le diverse tecnologie a film sottile anch'esse già viste. Per quanto riguarda il fotovoltaico di prima generazione non si può pensare ad un balzo tecnologico in grado di dare una svolta significativa a tale produzione, non si può fare altro che cercare di ottenere efficienze leggermente superiori e costi leggermente inferiori. Le tecnologie a film sottile, sempre più diffuse negli ultimi anni, si sono da sempre presentate come soluzione di per se più innovativa rispetto ai classici moduli fotovoltaici basati sui wafer di silicio. L'idea alla base era quella di produrre moduli a basso costo grazie all'impiego di modeste quantità di materiale per metro quadro di superficie, con una maggiore capacità di assorbimento solare a parità di potenza di picco. Se si esclude il silicio amorfo, rimane il dubbio di poter sostenere efficacemente la produzione delle tecnologie a film sottile per fattori legati ad esempio al costo di certi materiali, come ad esempio l'Indio, la disponibilità di altri (es: Tellurio) e la tossicità di altre sostanze come il Cadmio. Sulla base di queste considerazioni si sono negli ultimi anni sviluppati progetti e tecnologie in grado di anteporsi ai principali limiti delle tecnologie a film sottile andando così a creare un fotovoltaico innovativo, ovvero la terza generazione.

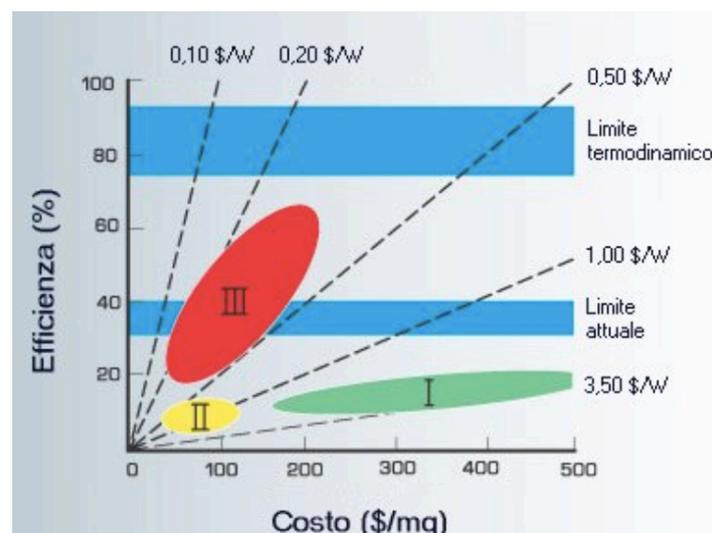


Figura 3.0 efficienza e costi delle tre generazioni fotovoltaiche

La figura sopra illustrata mostra l'andamento delle efficienze e dei costi a metro quadro delle diverse generazioni fotovoltaiche. In generale il fotovoltaico di terza generazione si pone due diversi obiettivi e in base a tali obiettivi viene raggruppato in una determinata famiglia. Alcune tecnologie si basano sul concetto del basso costo di produzione (come le celle organiche analizzate in seguito) mentre altre puntano ad un'alta efficienza. Quest'ultima famiglia risulta essere di rilevanza secondaria per l'edilizia sia per i costi troppo elevati sia per la fase primordiale in cui si trova adesso tale tecnologia.

Nei paragrafi successivi verranno presentate diverse soluzioni tecnologiche che sfruttano nuovi prodotti e concetti per produrre energia elettrica, il filo comune di tutte le varie proposte sarà sempre costituito dall'integrazione architettonica, considerata per questa ricerca il punto chiave.

3.1. Fotovoltaico a concentrazione

I sistemi a concentrazione CPV (Concentrated Photovoltaic) rappresentano attualmente la tecnologia in grado di arrivare alle più alte efficienze di conversione sfiorando anche il 40%. Questi sistemi sono basati su gruppi ottici costituiti da lenti e/o specchi in grado di concentrare la luce solare all'interno della cella fotovoltaica in modo da fargli assorbire una quantità maggiore di radiazione diretta ed aumentarne così le prestazioni. I sistemi a concentrazione sfruttano, oltre che al sistema ottico, anche sistemi di movimentazione per una sempre perfetta captazione solare e spesso vengono assemblati ad un sistema di raffreddamento per mantenere sempre elevata l'efficienza di conversione delle celle solari. Il sistema di movimentazione risulta spesso determinante in quanto per operare efficacemente si deve essere sempre sull'asse ottico del concentratore. Uno dei principali vantaggi dei moduli a concentrazione risiede nel costo di costruzione poiché la quantità di materiale tecnologicamente avanzato (celle fotovoltaiche) risulta minima, il peso della produzione si sposta dunque su di un componente ottico facilmente industrializzabile e di basso costo (se paragonato a quello della tecnologia fotovoltaica). Questo aspetto comporta di conseguenza un ulteriore passaggio, ovvero quello di poter utilizzare per i sistemi CPV le celle solari più avanzate presenti in commercio poiché la quantità estremamente ridotta di tale componente non ne fa eccessivamente alzare il prezzo finale.

Il fattore di conversione C indicato in soli (sun in inglese) esprime il rapporto tra la superficie esposta alla radiazione solare e la superficie della cella fotovoltaica su cui un sistema ottico convoglia tale radiazione.

In base alla capacità dei sistemi CPV di convogliare i raggi solari si possono classificare in diverse tipologie:

- sistemi a bassa concentrazione (LCPV) : C da 1 a 10 soli
- sistemi a media concentrazione (MCPV): $10 < C < 100$ soli
- sistemi ad alta concentrazione (HCPV): $C > 100$ soli

Solitamente nei primi due sistemi si utilizzano classiche celle al silicio cristallino mentre per i sistemi ad alta concentrazione si tende ad utilizzare celle multigiunzione ad alta efficienza.



Figura 3.1 esempio di sistema a concentrazione
(Fonte: www.qualeenergia.it)



Figura 3.2 esempio di sistema a concentrazione
(fonte: www.greenstyle.it)

Come si può notare dagli esempi grafici sopra riportati i sistemi a concentrazione maggiormente diffusi non si prestano molto all'integrazione architettonica a causa delle loro particolari ed ingombranti forme. I sistemi ad alta concentrazione richiedono lenti o specchi di notevoli dimensioni e se uniti ad un sistema meccanico di movimentazione rendono il prodotto finale sicuramente poco adatto all'installazione su edifici. I sistemi che meglio si prestano all'integrazione risultano essere quelli a media e bassa concentrazione in quanto necessitano di volumi inferiori e inoltre possono anche non essere dotati di inseguitori solari.

3.2. Building Integrated Concentrating PhotoVoltaics (BICPV)

3.2.1. BICPV a media concentrazione

Per quanto riguarda i moduli a media concentrazione MCPV una interessante soluzione viene offerta da CASE (Center of Architecture Science and Ecology) e dal suo sistema "Integrated Concentrating Solar Façade" (ICSF) progettato dalla professoressa Anna Dyson della facoltà di Ingegneria ed Architettura del Rensselaer Polytechnic Institute di New York.

I pannelli sono composti da moduli di forma piramidale con funzione di lente focale, con base maggiore costituita da una Lente di Fresnel (circa 25x25 cm) e base minore sulla quale si trova la cella in silicio (circa 3x3 cm). Intorno ad essa è collocato un piccolo tubo a spirale che costituisce il sistema di raffreddamento della cella e permette la produzione di energia termica grazie allo scambio di calore tra l'acqua che scorre al suo interno e la cella, inoltre raccoglie l'aria calda che si forma all'interno delle piramidi, garantendo una miglior stabilità del modulo, che altresì perderebbe in efficienza surriscaldandosi.



Figura 3.3 installazione BICPV (fonte: www.case.rpi.edu)

Elementi verticali in vetro uniscono i vari moduli e tramite un apposito sistema ne viene garantito il movimento, permettendo così ai dispositivi di inseguire il sole proprio come dei girasoli farebbero durante una normale giornata. Tale sistema, come già prima citato in precedenza, permette di ottenere una maggior produzione energetica ed una maggior efficienza infatti le lenti, inseguendo il sole, si vanno a disporre sempre perpendicolarmente alla radiazione solare diretta. Questo aspetto porta indirettamente anche ad un altro vantaggio, ovvero quello di fungere anche da schermatura solare, consentono grazie all'impiego del vetro un'ottima illuminazione naturale diffusa degli ambienti, permettendo un miglior comfort termoigrometrico, impedendo il surriscaldamento e l'abbagliamento.

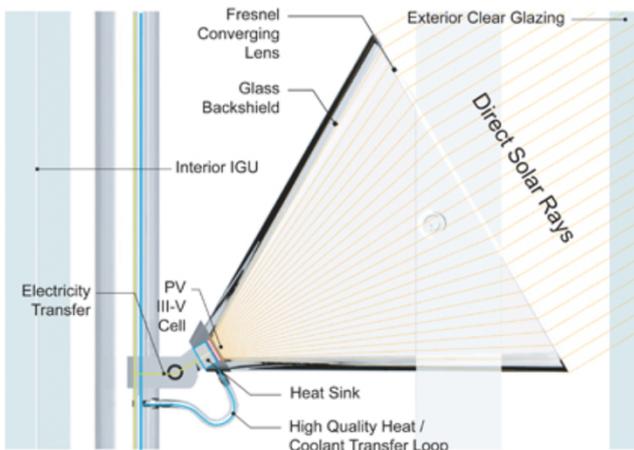


Figure 3.4 sx: schema grafico del sistema BICPV, dx: dettaglio del sistema BICPV (fonte: www.case.rpi.edu)

Un fattore importante di questo sistema è legato alla manutenibilità. Gli impianti a concentrazione sono soggetti ad un calo frequente dell'efficienza a causa del vento, della pioggia e della formazione di sporcizia sul sistema essendo posizionati in ambienti aperti soggetti dunque alle intemperie. Nel caso dei sistemi ICSF l'impianto è integrato nelle chiusure verticali esterne dell'edificio e trovandosi quindi all'interno di tale involucro risulta automaticamente protetto dagli agenti esterni. Questa soluzione permette dunque una maggior affidabilità e stabilità. Inoltre un aspetto di non secondaria importanza è la dismissione degli impianti fotovoltaici, nel caso in questione essendo costituiti per lo più da vetro sono quasi totalmente riciclabili.

L'efficienza energetica del modulo arriva fino al 43% con una stima della potenza elettrica di circa 42,5 W e una potenza termica di 18,27 W. Vanta una perdita di efficienza negli anni molto bassa: il 4% in 10 anni e il 7,5% in 25 anni. Risulta essere 2,4 volte più efficiente di un pannello fotovoltaico classico.

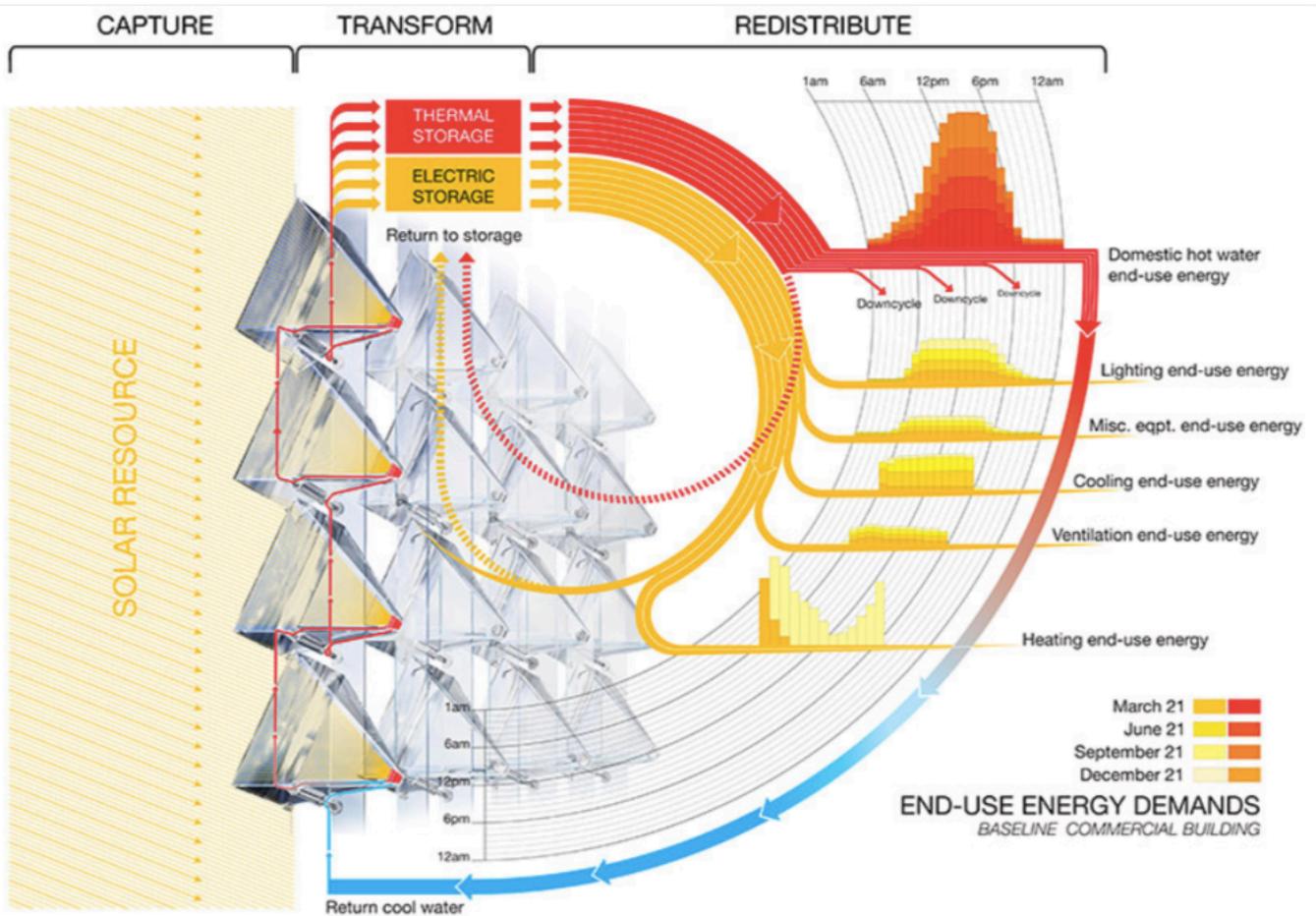


Figura 3.5 Schema di funzionamento del sistema (fonte: www.som.com)

Nonostante l'incredibile innovazione portata da questo sistema e dagli innumerevoli vantaggi da esso derivanti, tale prodotto anche se in grado di integrarsi in maniera efficace all'interno delle facciate degli edifici presenta un impatto estetico ancora troppo rilevante che potrebbe non essere pienamente apprezzato da un svariato numero di utenti. Per questo motivo nel paragrafo successivo verrà illustrato un sistema a bassa concentrazione che "sacrifica" il notevole rendimento ottenuto dai sistemi ICFS per dare spazio ad una perfetta ed invisibile integrazione architettonica per andare a mimetizzare in maniera quasi perfetta il sistema fotovoltaico e creare così edifici intelligenti in grado di produrre energia senza dover arrivare a nessun tipo di compromesso estetico.



Figure 3.6 rendering di esempio del sistema a concentrazione (fonte: www.case.rpi.edu)

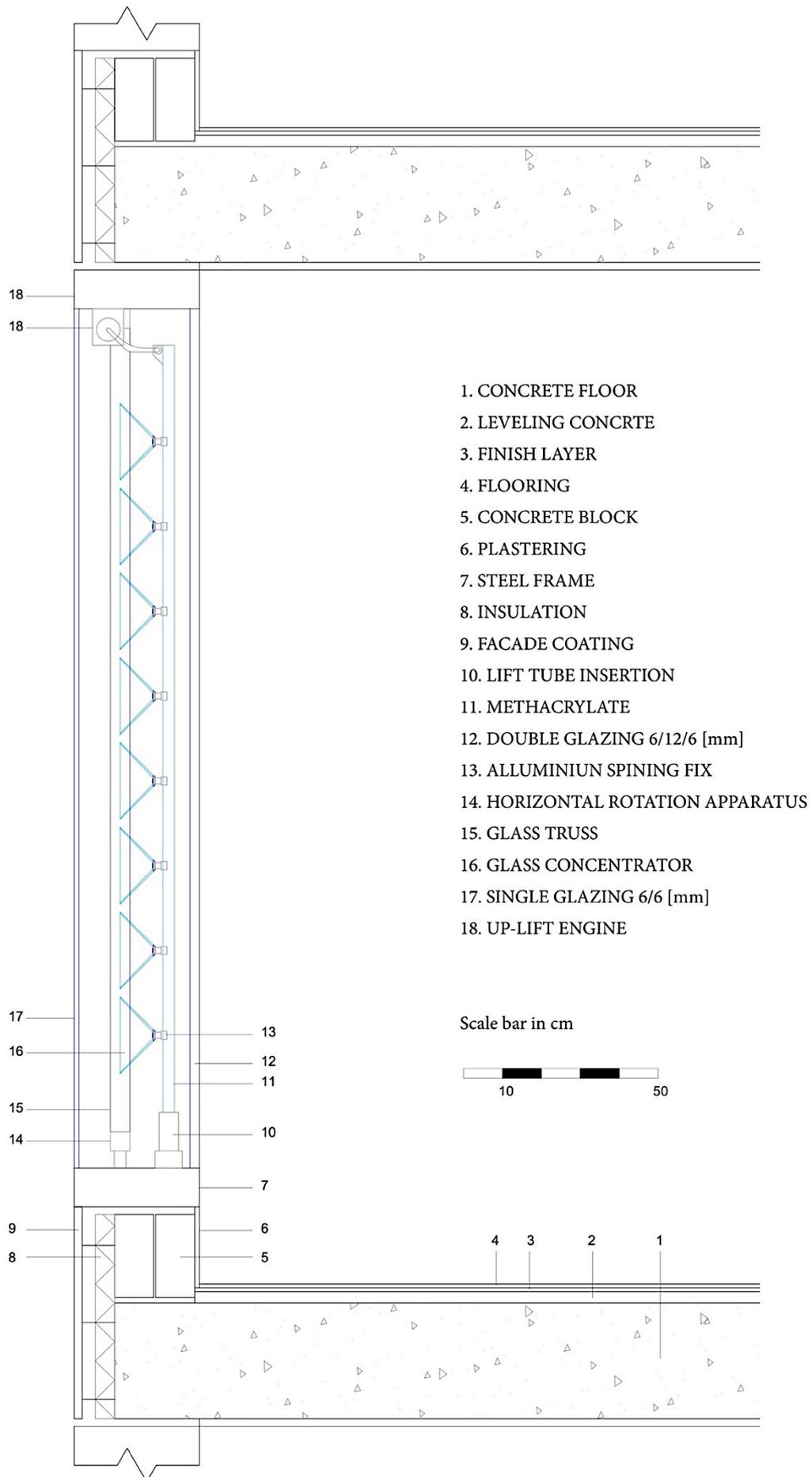


Figura 3.7 Sezione schematica dell'impianto (fonte: Energy Design Vol. IV/I, Adaptive Faced Systems)

3.2.2. BICPV a bassa concentrazione

Questi sistemi sono costituiti dagli LSC (Luminescent Solar Concentration: concentratori solari luminescenti) e risultano essere i più predisposti all'integrazione architettonica a causa delle loro particolari caratteristiche come ad esempio:

- sistemi di inseguimento solare non necessari
- geometria planare di facile integrazione
- possono essere di diversi colori oppure anche trasparenti in base alle diverse esigenze
- realizzati con materiale economico come la plastica

I concentratori solari luminescenti sono realizzati da lastre di materiale plastico, trasparente o colorato, drogato con opportuni cromofori, particolari molecole in grado di assorbire una parte della radiazione solare e rimetterla in modo isotropico all'interno della lastra ad una lunghezza d'onda maggiore. I fotoni così rimessi dai cromofori, attraverso il fenomeno della riflessione totale interna, vengono guidati all'interno della lastra verso i suoi bordi sottili dove apposite celle fotovoltaiche convenzionali al silicio cristallino raccolgono la radiazione solare trasformandola in energia elettrica.

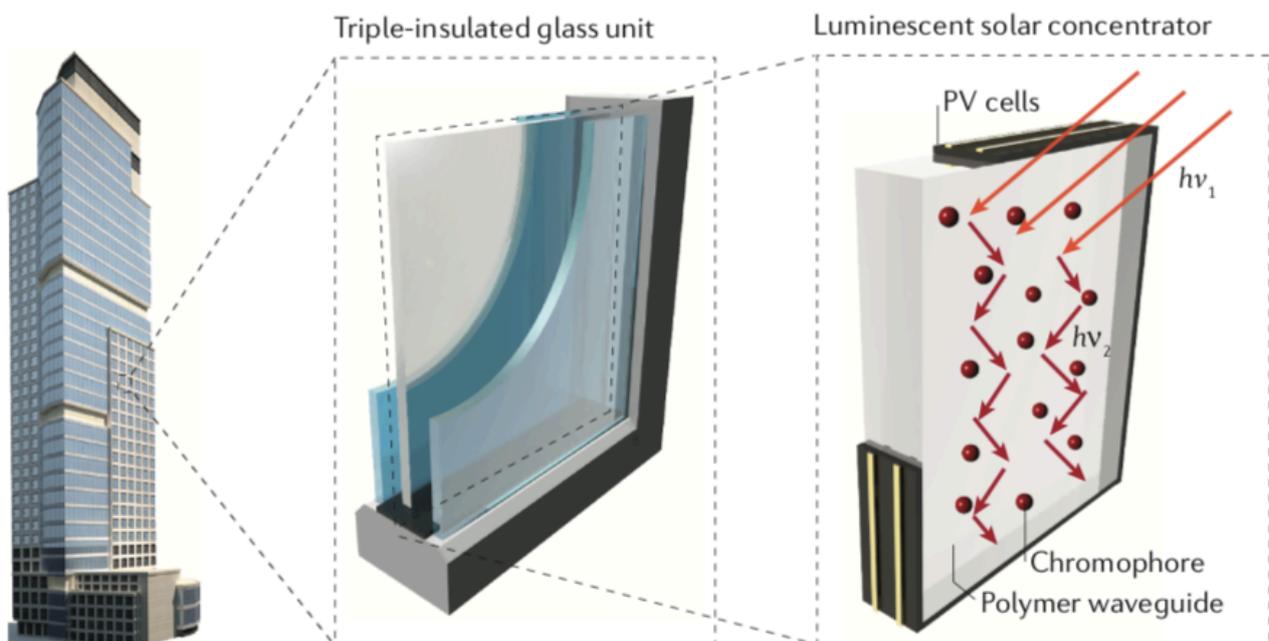


Figura 3.8 schema di funzionamento di una vetrata LSC (fonte:www.glasstoenergy.com)

Il fattore di concentrazione C in questo caso è calcolato come:

$$C = \eta_{\text{tot}} \times G$$

- G = fattore geometrico (rapporto tra l'area della superficie di captazione e quella dei bordi)
- η_{tot} = efficienza ottica

L'efficienza ottica è il rapporto tra l'energia della radiazione che viene convogliata verso i bordi della lastra e l'energia della radiazione solare incidente sul concentratore LSC e dipende da diversi fattori come ad esempio:

- riflessione della radiazione solare sulla lastra LSC
- mancato assorbimento della luce da parte del cromoforo
- rendimento quantico di fluorescenza del cromoforo inferiore a 1
- fenomeni di riassorbimento
- perdite di efficienza delle celle PV

Il principale vantaggio dei sistemi LSC rispetto agli altri sistemi a concentrazione come già citato risulta essere l'indipendenza dalla posizione del sole e quindi la possibilità di svincolarsi dal sistema di movimentazione. I pannelli luminescenti sono quindi in grado di catturare sia la radiazione solare diretta che quella diffusa o riflessa risultando così efficaci anche in condizioni di tempo nuvoloso o ombreggiamento risolvendo in questo modo il problema dell'orientamento. Un altro importante vantaggio, sempre citato in precedenza, risulta essere l'economicità del prodotto in quanto viene impiegato un materiale "povero" quale la plastica per la sua produzione e a parità di potenza installata si ha una significativa riduzione di materiale tecnologicamente avanzato (celle fotovoltaiche) e quindi una indiretta diminuzione del costo di costruzione.

Il loro unico design, abbinato al costo contenuto, collocano i sistemi LSC tra i più interessanti prodotti innovativi per l'integrazione architettonica e grazie alla possibilità di ottenere prodotti trasparenti il loro livello di mimetizzazione diviene eccezionale diventando così prodotti estremamente adatti a sistemi di facciate continue, singole vetrate e finestre. Tutti questi motivi rendono tale prodotto il più promettente per la realizzazione di edifici NZEB (Near Zero Energy Buildin) soprattutto nella grandi città dove gli spazi ridotti dovuti all'elevata intensità urbanistica rendono indispensabile la produzione di energia rinnovabile non solo in copertura ma anche in facciata.

Prima applicazione italiana sviluppata da Eni

Il primo progetto italiano è rappresentato dalla pensilina fotovoltaica di Eni inaugurata a Roma a fine 2012 dedicata al parcheggio di biciclette elettriche, la quale consente la ricarica delle batterie attraverso la corrente elettrica generata dai pannelli LSC in grado di produrre circa 500 Watt di picco di energia elettrica generati da 192 lastre fotovoltaiche trasparenti gialle raggruppate in 32 moduli contenenti 6 lastre ciascuno.



Figure 3.9 pensilina fotovoltaica di Eni a Roma (fonte: Eni)

La produzione totale di energia elettrica per questo sistema (data dalla somma di tutte le 192 lastre) oscilla tra i 415 kWh/anno e i 570 kWh/anno per una potenza di picco pari a 0,5 kWp.



Figure 3.10 esempi di applicazioni dei pannelli LSC realizzati da ENI per l'implementazione su finestre (fonte: eniday.com)

Le nanoparticelle immerse nella lastra che attribuiscono la tipica colorazione gialla del sistema LSC realizzato da Eni sono quelle che meglio ottimizzano la resa energetica ma per una corretta integrazione architettonica il componente deve tuttavia essere pensato e analizzato con cura tramite una buona progettazione che se trascurata può portare alla creazione di disturbi visivi quando non vengono analizzate tutte le condizioni e i parametri d'utilizzo. Nel seguito verrà invece mostrata una nuova soluzione che permette di ovviare a questo problema offrendo un prodotto praticamente trasparente.

Tecnologia di Glass to Power

La tecnologia sviluppata da Glass to Power (Azienda nata a Milano nel 2016) permette di fare un notevole passo avanti nell'utilizzo degli LSC poiché è in grado di offrire anche sistemi fotovoltaici praticamente trasparenti in grado quindi di garantire un basso impatto estetico ed integrare il prodotto in maniera quasi invisibile all'interno di edifici sia di nuova realizzazione (come ampie facciate vetrate), ma anche all'interno di finestre di edifici storici vincolati. La trasparenza del sistema è possibile grazie al comportamento omogeneo su tutto lo spettro della luce solare.

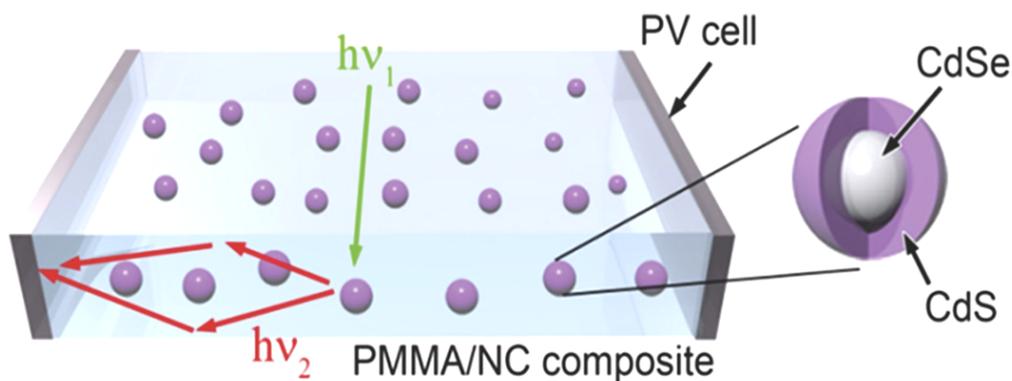


Figura 3.11 schema grafico di un sistema LSC trasparente (Fonte: Glass to Power)

Nella figura 3.11 si può notare come le nanoparticelle contenute nella lastra di PMMA assorbano la radiazione solare incidente con una certa lunghezza d'onda ($h\nu_1$) e la riemettono all'interno della lastra ad una lunghezza maggiore ($h\nu_2$). Le nanoparticelle sono realizzate con materiali inorganici stabili all'irraggiamento solare come il silicio e garantiscono una durabilità elevata della produzione di energia elettrica. Fino a poco tempo fa si utilizzavano, per la realizzazione dei cromofori, complessi sistemi a base di elementi potenzialmente tossici come il cadmio, o costosi come l'indio e il selenio. Attualmente questi elementi sono stati sostituiti con delle nanosfere di silicio, materiale più economico, abbondante in natura, non tossico e in grado di assorbire efficacemente la radiazione solare. Nella forma convenzionale, il silicio non è in grado di rimettere la luce una volta assorbita, ma riducendo le dimensioni dei cristalli di silicio a pochi miliardesimi di millimetro la natura viene come ingannata consentendo di emettere a propria volta la luce incidente.

Scegliendo opportunamente i cromofori è comunque possibile ottenere:

- lastre con un grado di trasparenza variabile a seconda delle esigenze del cliente per ottenere il miglior compromesso tra energia assorbita e quantità di luce trasmessa
- lastre colorate nel caso di realizzazioni dal particolare design

PMMA : il Polimetilmetacrilato (PMMA) a livello commerciale è meglio noto come plexiglas. E' una resina utilizzata per realizzare ad esempio componenti trasparenti come arredi o elettrodomestici ma anche per la creazione di lenti. Il materiale è ottenuto dal trattamento chimico di sottoprodotti della raffinazione del petrolio e grazie alla sua duttilità è normalmente prodotto in lastre (per estrusione o colatura) oppure stampato. Inoltre risulta essere di facile lavorazione. Possiede una elevata trasparenza (circa 0,93) ed è molto più leggero del vetro ($1,19 \text{ g/cm}^3$ anziché $2,6 \text{ g/cm}^3$). Il pmma resiste bene all'umidità e brucia a temperature superiori a $460 \text{ }^\circ\text{C}$.

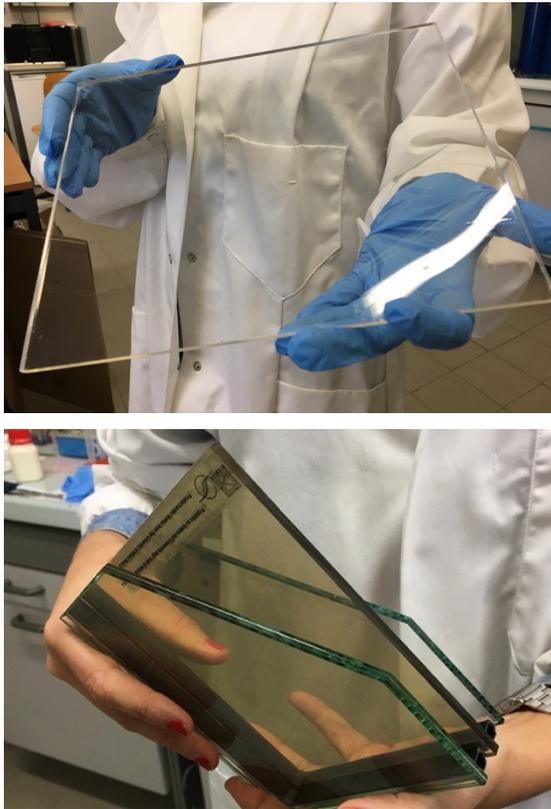


Figure 3.12 fasi di montaggio di un pannello LSC incapsulato all'interno di un modulo vetrato (fonte: Glass to Power)

Pannello LSC prodotto da Glass to Power con altezza $h=0,70 \text{ m}$, larghezza $l=0,50 \text{ m}$ e area $A=0,35 \text{ m}^2$. Potenza per un pannello di queste dimensioni: circa 50W/m^2 (La potenza varia anche in base alle dimensioni del pannello poiché estensioni troppo elevate della superficie riducono l'efficienza ottica del sistema a sfavore del rendimento energetico).

Il grado di trasparenza alla luce nella regione del visibile è pari al 80%, solo il 20% della radiazione solare è utilizzata per la produzione di energia elettrica mentre il resto attraversa il pannello per illuminare gli ambienti interni. L'efficienza di questi sistemi si aggira attorno al 5% ma varia in funzione delle dimensioni e del tipo di cromoforo utilizzato.

Prima applicazione sperimentale dei pannelli LSC di Glass to Energy

Questi innovativi pannelli sono ancora in fase di certificazione energetica, per cui non è ancora possibile la commercializzazione del prodotto. Al momento la principale realizzazione ancora sperimentale si trova a Rapallo nell'ambito di un progetto con Ferrovie Italiane e Sirti inaugurato a fine settembre del 2018. Rapallo, è la prima stazione ferroviaria a far parte del progetto pilota Green Hub nella quale è stata installata la piattaforma sperimentale multisorgente Dynamo ideata dalla star up Verde 21 che mette a disposizione dell'utenza nuovi servizi di ricarica per devices sfruttando energia proveniente da sole fonte rinnovabili. Dynamo integra prodotti provenienti da diverse star up italiane tra cui appunto i pannelli LSC di Glass to Power.



Figure 3.13 piattaforma multisorgente Dynamo inaugurata alla stazione ferroviaria di Rapallo il 28 settembre 2018 in cui sono stati installati anche i pannelli LSC trasparenti di Glass to Power (fonte:www.fsnews.it)

3.3. Fotovoltaico con celle organiche

I pannelli solari convenzionali in silicio cristallino, seppur al momento rappresentino la tipologia fotovoltaica più diffusa presentano comunque diversi difetti tra cui ad esempio il prezzo. Produrre un cristallo di Silicio di sufficiente purezza, tagliarlo in wafer, drogarlo, fissare l'elettrodo superiore a griglia e l'elettrodo posteriore, montare la cella e collegarla elettricamente alle altre celle che compongono il modulo, fissarle a un supporto, proteggerle con una lastra di vetro e montare tutta l'intelaiatura del pannello rappresentano, anche se in continua discesa, ancora un costo abbastanza elevato. Un altro problema che andrebbe comunque considerato è lo smaltimento del materiale fotovoltaico a fine vita utile. Una delle più promettenti tecnologie che cerca di ovviare il più possibile a queste tipologie di problemi è rappresentata dai moduli a celle organiche che vanno sotto la sigla di OPV (Organic PhotoVoltaics).

Nel mondo sono sempre più numerosi i centri di ricerche che si stanno specializzando nello studio dei sistemi OPV analizzando varie possibili combinazioni di polimeri e di molecole organiche in grado di catturare la luce del Sole, impiegarla per eccitare speciali molecole, provocare l'espulsione di elettroni e, infine, produrre corrente elettrica. Tutto il processo avviene dunque senza nessun utilizzo del silicio cristallino.

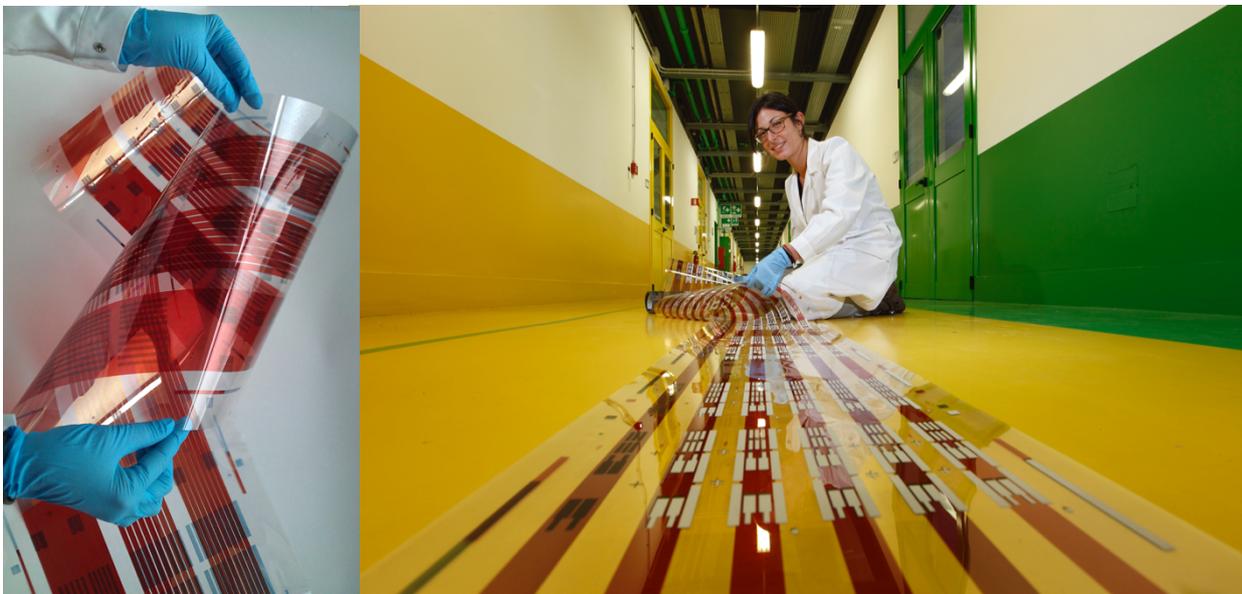


Figure 3.14 esempi di celle organiche (fonte: www.eniday.com)

In Italia la tecnologia OPV viene sviluppata da diverse aziende tra cui il centro ricerche Eni per le energie rinnovabili. Anche l'Agenda Nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (centro ENEA) sta cercando di migliorare la tecnologia organica ma una delle aziende maggiormente avanti su tale tecnologia è rappresentata dalla società tedesca Heliatek che ha già realizzato un prodotto commerciabile.

Le celle solari OPV risultano essere estremamente sottili, ovvero nell'ordine dei nanometri. Un utile confronto si può fare pensando ad un chilogrammo di puro Silicio cristallino che permette di produrre circa un paio di metri quadrati di moduli fotovoltaici quando con un solo chilogrammo di sostanze organiche adatte all'impiego di una cella OPV si potrebbero ricoprire con moduli fotovoltaici più di due campi da basket.

Le tipologie di composti organici (polimerici o a basso peso molecolare) che possono essere utilizzate per l'impiego fotovoltaico sono quasi infinite.

Esempi di polimeri semiconduttori: Polifenilene-Vinilene, Polianilina, Politiofene.

Stratigrafia celle fotovoltaiche organiche:

- materiale protettivo di rivestimento esterno in plastica o vetro
- elettrodo superiore trasparente conduttivo (TCO: Trasparent Conductive Oxide)
- materiale attivo costituito da due diversi tipi di molecole organiche o polimeri, uno con funzione di donore e l'altro di accettore di elettroni
- elettrodo inferiore metallico.

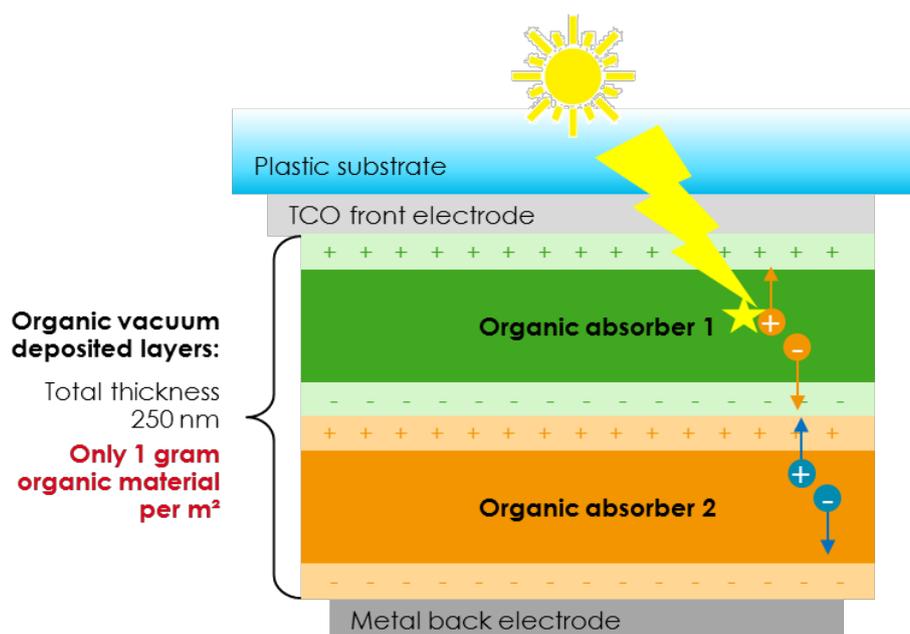


Figura 3.15 Stratigrafia di una cella organica con due strati di materiale organico assorbente (fonte: www.heliatek.com)

L'assorbimento della luce e la conseguente formazione di elettroni e lacune avviene nello strato organico che è anche responsabile del trasferimento agli elettrodi delle cariche fotogenerate.

In queste celle la luce solare genera all'interno della giunzione donore-accettore, delle coppie legate di elettroni e lacune, ovvero gli eccitoni. Gli eccitoni sono elettricamente neutri, procedono verso la giunzione per diffusione dove si separano in cariche libere e successivamente raggiungono gli elettrodi. Il cammino libero degli eccitoni si aggira mediamente sulla decina di nanometri (nm) motivo per cui lo spessore medio degli strati non può essere troppo superiore a questo valore. Uno strato troppo sottile non assorbe in maniera efficace l'intera gamma dello spettro solare per cui conviene sostituire la classica giunzione piana con una giunzione distribuita miscelando intimamente donore e accettore stando sempre sulla scala della decina di nm. L'importante è che i due composti siano miscelati in modo da ottenere percorsi continui anche se contorti per le cariche verso gli elettrodi. Questo tipo di struttura consente di alzare l'efficienza della cella in modo significativo. Il tempo di vita delle celle basate sui composti organici è molto influenzato dall'esposizione all'aria, all'acqua e ai raggi ultravioletti che deteriorano rapidamente i polimeri, motivo per cui risulta fondamentale sigillare in maniera perfetta il modulo con lo strato esterno protettivo in grado di filtrare anche i raggi UV.

Da notare che la struttura di una cella fotovoltaica organica è sostanzialmente la stessa di una sorgente di luce organica a stato solido, gli OLED (Organic Light Emitting Diode: diodo organico a emissione di luce). Negli OLED viene fornita una tensione dell'esterno che consente il trasporto ad un flusso di cariche positive e negative di raggiungere lo strato di giunzione dove vengono convertite in luce. Il processo è dunque opposto a quello del sistema fotovoltaico.

Il sistema per realizzare celle OPV tramite l'impiego di materiali organici risulta essere completamente diverso da quello utilizzato ad esempio per creare i moduli convenzionali in silicio cristallino. Le celle vengono stampate con sistemi simili a quelli impiegati per produrre riviste a colori. Al posto di imprimere inchiostri di differenti colori in successione, vengono stampati in sequenza i diversi strati necessari a comporre la cella. La stampa può avvenire ad esempio su rulli di sottile materiale plastico trasparente ottengono così pannelli solari estremamente leggeri, flessibili e di qualsiasi forma particolarmente adatti all'integrazione architettonica. Esiste anche la possibilità di fissione del materiale per evaporizzazione (processo visto nel seguito).

Si possono produrre così moduli OPV su misura, in base alla tipologia di stampa si ottengono differenti proprietà elettriche di voltaggio e amperaggio per soddisfare i differenti requisiti richiesti dalle varie applicazioni in particolar modo dando molto spazio all'esigenze di design particolari.

L'efficienza dei moduli organici risulta ancora inferiore rispetto ai più dispendiosi pannelli in Silicio ma presentano l'enorme vantaggio (come nel caso dei moduli a film sottile con materiali inorganici) di non dipendere molto dalla posizione, dall'angolazione e dalla luce diretta. Questi sistemi saranno dunque in grado di produrre energia elettrica anche in condizioni di sola luce diffusa come nel caso di giornate nuvolose.

L'applicazione più importante per i sistemi OPV risulta quella dell'integrazione architettonica evolvendo il più "semplice" concetto di BIPV (Building Integrated PhotoVoltaics) ad un nuovo termine, il BIOPV (Building Integrated Organic PhotoVoltaics).

Dopo aver descritto in maniera sintetica il principio di funzionamento del fotovoltaico organico verranno nel seguito forniti una serie di dati tecnici, caratteristiche e potenzialità dei prodotti a base di carbonio. I dati vengono in questo caso estrapolati da uno dei maggiori produttori di OPV attuali: la Heliatek.

3.3.1. Funzionamento del fotovoltaico organico

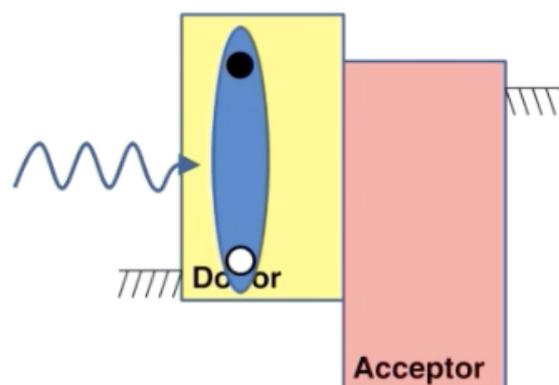
La descrizione del funzionamento viene estrapolata dal sito nanoflexpower.com.

Una cella solare OPV è costituita da una serie di sottili strati organici racchiusi tra due elettrodi. Il meccanismo di base della generazione di corrente in un sistema OPV può essere illustrato con due materiali organici: un donatore di elettroni (D) e un accettore (A).

Assorbimento della radiazione solare:

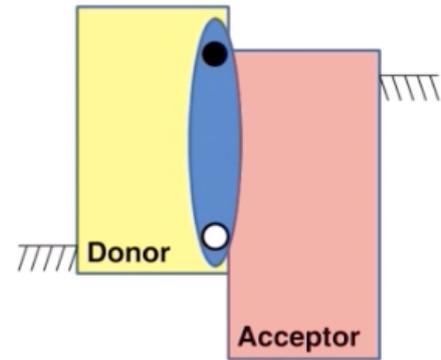
Il primo passo del processo è l'assorbimento della luce, che porta alla formazione di un eccitone.

L'eccitone può essere formato nello strato donatore o accettore. Al fine di coprire una grande frazione dello spettro solare, i materiali costituenti gli strati donatore e accettore sono scelti in modo da coprire un'ampia gamma della radiazione solare.



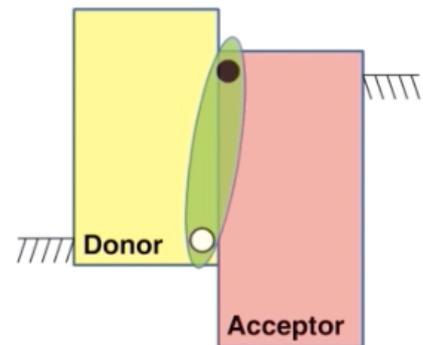
Diffusione degli eccitoni:

Una volta formato, l'eccitone migra all'interfaccia D / A o in alternativa decade allo stato fondamentale. I materiali e gli spessori del film vengono accuratamente selezionati per massimizzare la resa degli eccitoni che raggiungono l'interfaccia D / A.



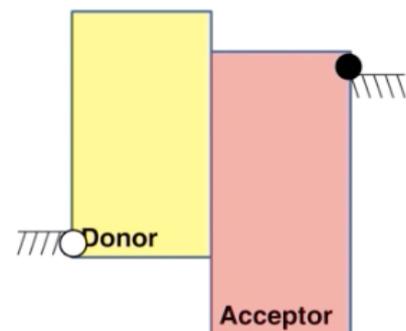
Separazione della carica

All'interfaccia D / A l'eccitone subisce una reazione di trasferimento di carica, formando una lacuna e un elettrone rispettivamente negli strati D e A. In questo processo un elettrone viene trasferito dal donatore all'accettore. La scelta ottimale di una coppia di materiali D / A è quella che fornisce una separazione efficiente della carica di eccitone, ma mantiene una grande differenza di energia tra la lacuna del donatore e l'elettrone accettore per mantenere una tensione di cella elevata.



Trasporto e raccolta della carica

Dopo che la lacuna e l'elettrone sono stati generati, sono condotti attraverso i materiali D e A ed estratti dagli elettrodi (raccolta di carica). Quando le cariche raggiungono l'elettrodo e vengono estratte e trasferite al circuito esterno, l'elettrone viene trasferito al catodo e la lacuna all'anodo.



3.2.2. Dati tecnici di moduli fotovoltaici a base di composti organici

Peso delle pellicole fotovoltaiche organiche:

1 kg / m² (meno del 5% del peso dei moduli solari tradizionali). Moduli ultraleggeri, flessibili e ultrasottili (meno di un millimetro nel totale, strato di materiale fotovoltaico attivo inferiore ai 250 nm).

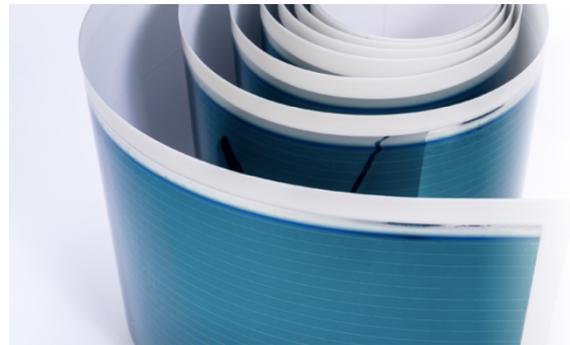


Figura 3.16 esempio di pellicola organica (fonte: Heliatek)

Rendimento energetico:

- moduli stabili anche in condizioni di alte temperature (non necessitano di ventilazione apposita)
- generano corrente anche in condizioni di scarsa illuminazione (rendimento energetico più stabile)
- efficienza max celle organiche raggiunta in laboratorio del 13,2 %
- efficienza prodotto commercializzato del 6 - 7 %.

Lunghezze: da 0,3 m fino a 6 m (personalizzabili in base alle esigenze del cliente).

varietà di colori:



Produzione green:

Realizzare un 1 m² di lamina solare richiede solo 1 g di materiale organico. Nella produzione dei film solari organici non vengono utilizzati materiali tossici o metalli pesanti. Ciò impedisce costosi processi di riciclaggio e consente un facile smaltimento dei film alla fine della loro vita.

Riduzione dei costi:

Il costo di produzione, oltre che essere contenuto dall'esigua quantità di materiale organico utilizzato, viene ulteriormente ridotto dalle basse temperature richieste dal processo, se per realizzare moduli fotovoltaici al silicio cristallino sono necessarie temperature superiori ai 1000 ° C e per i moduli a film sottile di seconda generazione ci si aggira sui 400/600 ° C , per realizzare i moduli organici è necessaria una temperatura di processo di soli 120 ° C.

Energy pay back time: inferiore a 3 mesi.

Produzione roll-to-roll:

La produzione delle pellicole solari avviene in un efficiente processo "roll-to-roll" sotto vuoto e in atmosfera inerte. In questo caso non vengono utilizzate macro molecole polimeriche con un processo simile a quello della stampa su carta come citato in precedenza ma piccole molecole vengono depositate a vapore direttamente sul substrato. Per mezzo di una struttura laser molto precisa, la superficie disponibile viene utilizzata in modo ottimale.



Figure 3.17 linea di produzione di un prodotto OPV (fonte: Heliatek)

3.4. Building Integrated Organic Photovoltaics (BIOPV)

Nel seguito verranno presentati vari esempi di applicazioni BIOPV, il materiale illustrativo viene direttamente estrapolato dal sito dell'azienda Heliatek che fornisce una vasta gamma di soluzioni progettuali proponendo due differenti prodotti in base al tipo di applicazione: i moduli HeliaSol vengono impiegati su strutture già esistenti (adattandosi in maniera perfetta alla struttura) mentre i moduli HeliaFilm sono utilizzati per edifici di nuova costruzione e vengono quindi proposti già integrati all'interno delle varie unità tecnologiche.

3.4.1. Esempi di applicazioni BIOPV su strutture esistenti

Applicazione su una copertura metallica:



Figure 3.18 installazione OPV (fonte: Heliatek)

La più grande installazione BIOPV del mondo con HeliaSol in Francia a La Rochelle, è stata inaugurata nell'autunno 2017. Circa 500 m² di moduli solari HeliaSol sono stati installati sul tetto della scuola media Pierre Mendes . Con un rendimento annuo di circa 23,8 MWh, è possibile coprire circa il 15% del fabbisogno annuale di energia elettrica della scuola. Sono stati installati quasi 400 film in tre diverse lunghezze di 2 m, 4 m e 5,7 m. Per trasferire 500 m² di HeliaSol, un team di 6 persone ha bisogno di solo 8 ore. Ciò dimostra quanto sia facile e rapida l'installazione delle lamine solari, rendendo così il prodotto ottimale per installazioni su edifici esistenti senza notevoli sforzi.

Realizzazione	novembre 2017
potenza installata	22,5 kWp

Applicazione su un impianto di biogas in acciaio:



Figure 3.19 installazione OPV (fonte: Heliatek)

Prima installazione di un film solare organico su un impianto di biogas di Bergheim-Paffendorf, in Germania. E' stata ricoperta un'area di circa 95 m², il modulo HeliaFilm viene installato direttamente sulla lamiera d'acciaio profilata della facciata esterna del fermentatore. Di particolare vantaggio è il peso ridotto di HeliaFilm, che consente l'installazione su delle chiusure verticali esistenti influenzando in maniera quasi nulla la statica della costruzione soprattutto se paragonata ad altre tecnologie. Il comportamento stabile ad alta temperatura del film consente l'applicazione diretta del film sulla facciata senza ventilazione speciale.

Realizzazione	giugno 2016
potenza installata	5,4 kWp
Orientamento	sud-ovest

Applicazione su di una chiusura verticale metallica di un capannone:

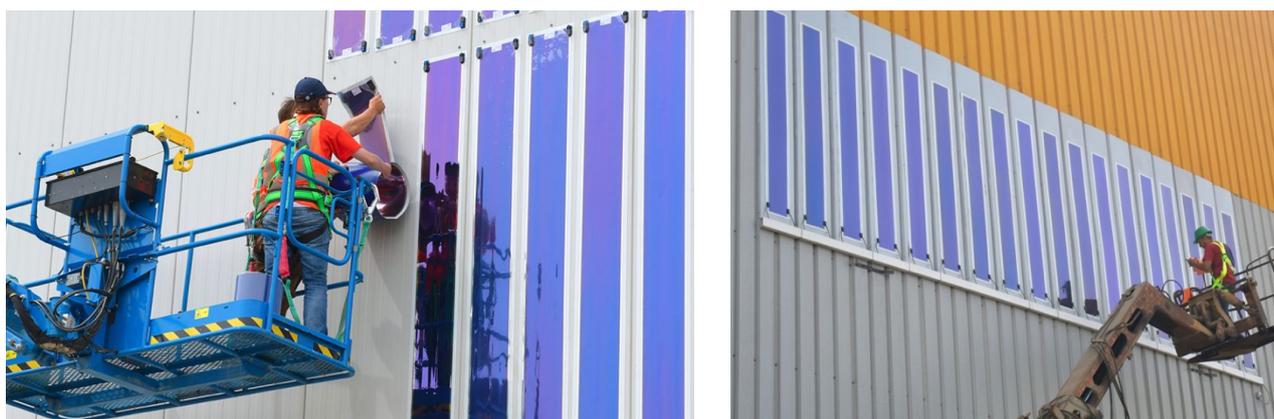


Figure 3.20 installazione OPV (fonte: Heliatek)

Facciata OPV nel porto di Duisburg installata ad agosto 2018. Circa 185 m² di pellicola fotovoltaica organica per un totale di 192 fogli HeliaSol di 3 m di lunghezza per 0,32 m di larghezza, rendendola di fatto la più grande installazione OPV in facciata ad oggi mai realizzata.

Realizzazione	agosto 2018
Orientamento	sud-ovest

3.4.2. Esempi di applicazioni BIOPV su strutture ex novo

Applicazione su una facciata in vetro:



Figura 3.21 Installazione OPV (fonte: Heliatek)

Installazione BIOPV a Dresda presso la sede Heliatek. Il film solare è stato laminato tra due pannelli di vetro. Questa applicazione ha principalmente la finalità di dimostrare le buone prestazioni anche in condizioni di scarsa illuminazione (orientamento a nord-est con inclinazione di 80°).

Realizzazione	agosto 2014
potenza installata	1 kWp
Orientamento	nord - est

Applicazione su di una chiusura verticale in fibrocemento:



Figure 3.22 installazione OPV (fonte: Heliatek)

Esempio di installazione in facciata con un totale di 56 m² di HeliFilm integrati in pannelli in fibra di cemento bianco (foto di sinistra). La facciata dimostra come si possa ottenere un miglioramento sia energetico che visivo negli edifici. Questa applicazione è stata anche realizzata per creare una piattaforma di test per il confronto tra fotovoltaico classico e organico.

Realizzazione	ottobre 2017
potenza installata	2,43 kWp
Orientamento	sud - ovest

Applicazione su strutture gonfiabili in PVC:



Figure 3.23 installazione OPV (fonte: Heliatek)

Progetto pilota per una sala gonfiata ad aria autosufficiente a Berlino. Prima installazione del modulo solare HeliFilm su una membrana in PVC. Viene così dimostrato l'applicazione a strutture leggere per la produzione di energia. L'energia prodotta è utilizzata direttamente per l'illuminazione e il sistema di ventilazione della sala gonfiata ad aria.

Realizzazione	novembre 2014
potenza installata	1,4 kWp
Orientamento	sud

3.4.3. Montaggio di un sistema OPV su struttura esistente

Nel seguito verrà illustrata la sequenza di montaggio di un modulo organico implementato su di una copertura metallica esistente eseguita da due soli operatori. Le illustrazioni grafiche vengono estrapolate da un video caricato sul sito internet dell'azienda produttrice (www.heliatek.com).

Questo paragrafo vuole mettere in evidenza l'estrema facilità di installazione del prodotto OPV che non richiede nessun intervento particolare per la sua messa in opera e allo stesso tempo necessita di un tempo estremamente breve di installazione. A tale proposito nelle varie immagini proposte nel seguito viene sempre evidenziato un cronometro che mette evidenza in maniera significativa la rapidità dell'intervento.

Step 1

Il modulo viene srotolato nella posizione prestabilita.



Step 2

Una volta posizionato viene tolto l'adesivo inferiore per farlo aderire perfettamente alla struttura metallica.



Step 3

Infine, una volta incollato il modulo alla copertura, viene tolta la pellicola superiore di protezione.



Le varie sequenze di montaggio mostrano quindi quanto sia facile e rapido installare questa particolare tecnologia su coperture esistenti, come si può notare dall'ultima immagine un modulo organico di 5,7 m per 0,32 m viene installato in poco più di 2 minuti senza richiedere nessuno sforzo particolare agli operatori (vantaggio agevolato dall'estrema leggerezza del prodotto).

4.5. Solar Roof di Tesla

Il sistema Solar Roof sviluppato da Tesla (società fondata nel 2003 da Elon Musk) rappresenta una soluzione che forse si potrebbe definire semplice ma geniale. Queste particolari tegole fotovoltaiche sono in grado di unire in maniera impeccabile l'estetica e l'efficienza. Come analizzato in precedenza, le soluzioni fotovoltaiche (anche nel campo dei migliori sistemi BIPV) hanno per loro natura una componente estetica che, anche tramite l'impiego di apposite forme, colorazioni e perfette integrazioni architettoniche, lascia pur sempre un segno più o meno indelebile del suo impiego. L'innovazione portata da Tesla sta proprio nell'altissimo grado di mimetizzazione posseduto dal suo sistema brevettato che, riproducendo in maniera estremamente fedele la forma e la colorazione di una normale tegola riesce a nascondersi perfettamente nei sistemi di copertura tradizionali senza lasciare tracce evidenti.

Questa serie di considerazioni ha portato ad inserire il Solar Roof all'interno delle tecnologie innovative di questa ricerca anche se non rispecchiamo appieno il concetto alla base del fotovoltaico di terza generazione che si prefigge l'obiettivo di fornire soluzioni a basso costo proponendo quindi sistemi che si distacchino dalla tecnologia al silicio cristallino. Il Solar Roof, utilizzando come generatore solare celle al silicio cristallino, non dovrebbe rientrare in questa categoria ma la sua spiccata invisibilità architettonica non può passare inosservata. Tegole fotovoltaiche ad alta mimetizzazione potrebbero quindi prestarsi molto bene ad interventi sull'edilizia esistente soggetta a vincoli architettonici e paesaggistici (già analizzati nel capitolo 2) permettendo la conservazione del patrimonio storico e allo stesso tempo l'abbattimento dei consumi energetici senza dover creare nessun tipo di compromesso. In questi specifici interventi edilizi si può dunque pensare di avere costi maggiori per l'inserimento di un fotovoltaico ad alta invisibilità con lo scopo di preservare la storicità del bene.



Figura 3.24 esempio di Solar Roof in funzione (fonte: www.electrek.co)

4.5.1. Tipologie di tegole

Al momento vengono proposte dalla società 4 differenti tegole solari:

Tegola ardesia



Figura 3.25 (fonte: Tesla)

Tegola smerigliata



Figura 3.26 (fonte: Tesla)

Tegola toscana



Figura 3.27 (fonte: Tesla)

Tegola liscia



Figura 3.28 (fonte: Tesla)

4.5.2. Tecnologia applicata

Le tegole, anche se apparentemente diverse tra di loro, risultano tutte costituite dallo stesso materiale esterno di rivestimento ovvero un vetro opportunamente trattato per ogni singola tipologia di tegola. L'innovazione di questo prodotto risiede proprio nella sua estetica in quanto la tecnologia impiegata risulta essere quella già ormai più che consolidata delle celle al silicio cristallino. Oltre alla loro innovativa soluzione fotovoltaica le tegole solari di Tesla offrono una maggiore resistenza agli agenti atmosferici (pioggia e grandine) rispetto alle più tradizionali tegole in ceramica e garantiscono anche una maggiore durabilità.

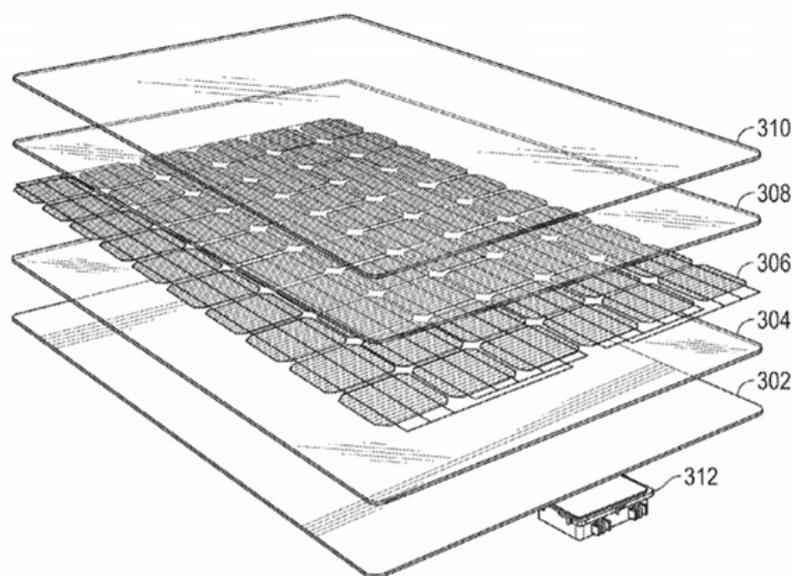


Figura 3.29 Stratigrafia tegola solare Tesla (Fonte: brevetto del prodotto pubblicato dall'agenzia United States Patent and Trademark Office)

Le celle fotovoltaiche vere e proprie appoggiano su due strati: quello di base (302) e quello definito di incapsulamento inferiore (304). Al di sopra delle celle troviamo altri due strati ovvero quello esterno protettivo in vetro temperato (310) e quello direttamente al di sotto di questo a diretto contatto con le celle definito strato di incapsulamento superiore (308). Quest'ultimo strato citato risulta essere fondamentale per la tecnologia sviluppata da Tesla in quanto, oltre che ad assumere colorazioni differenti integra specifiche "alette inclinate" annegate all'interno della sua struttura. Per capire a cosa servano si può fare un paragone pensando a delle persiane applicate ad una finestra che permettono il passaggio della luce (anche se in maniera ridotta) impedendo allo stesso tempo di poter guardare all'interno dell'abitazione nel caso in cui ci si trovasse all'esterno. Tesla riesce così ad ottenere con questa scelta un incredibile impatto estetico in quanto dal piano del terreno la copertura risulta essere costituita da classiche tegole mimetizzando perfettamente le

celle solari che senza tale escamotage risulterebbero esattamente uguali ai classici sistemi a vista in silicio monocristallino semplicemente di forma diversa.

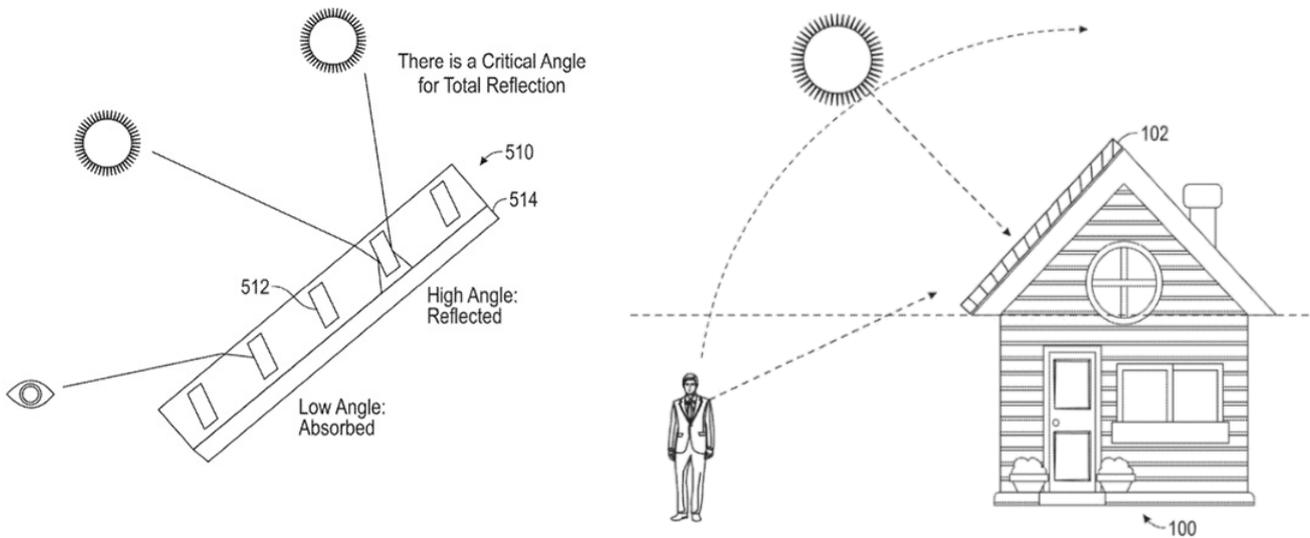


Figure 3.30 (fonte: brevetto del prodotto pubblicato dall'agenzia United States Patent and Trademark Office)

La visione delle tegole dall'alto porterebbe di conseguenza ad una visione differente. Ma l'idea è proprio quella di fornire una differente percezione delle tegole (dal lato strada) senza però impedire ai raggi solari di raggiungere le celle con un rendimento che è del 98% se paragonato con quello dei normali pannelli. In sostanza, la perdita del 2% rispetto al rendimento di un pannello convenzionale è ritenuta da Tesla del tutto giustificata, se fra i vantaggi risulta incluso quello di avere un tetto solare in tutto e per tutto identico a quelli tradizionali.

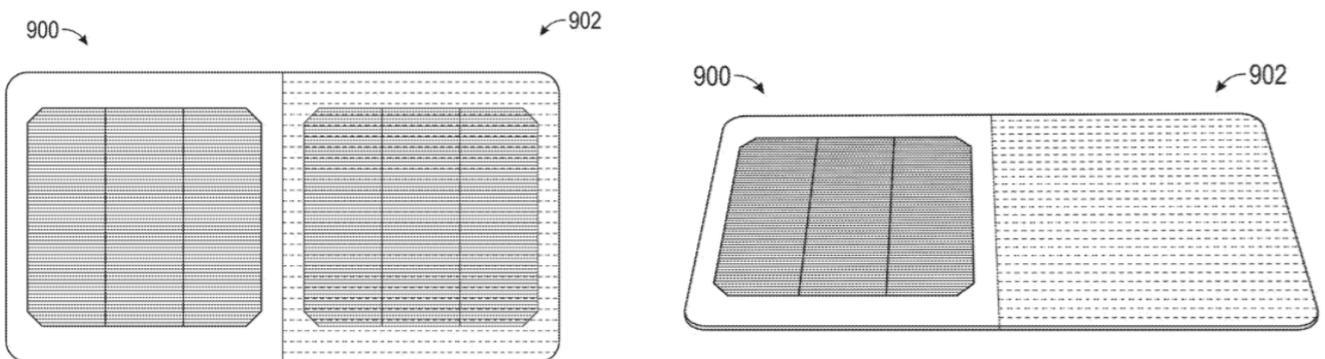


Figure 3.31 (fonte: brevetto del prodotto pubblicato dall'agenzia United States Patent and Trademark Office)

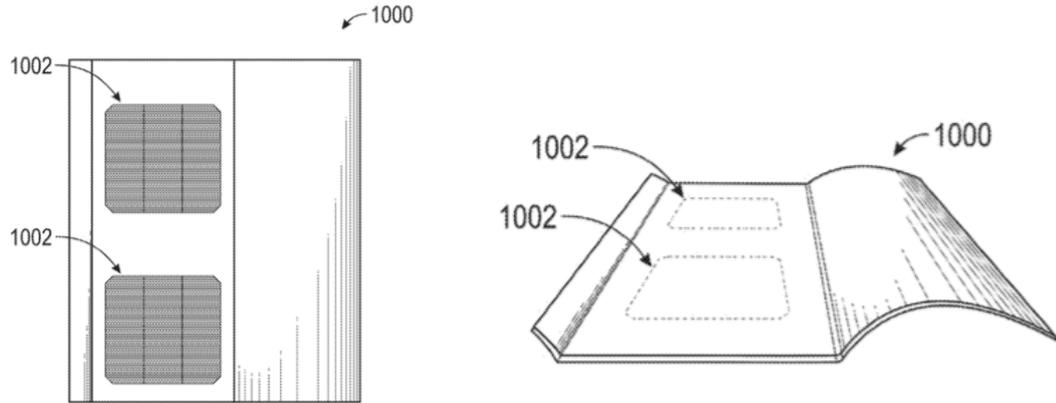


Figure 3.32 (Fonte: brevetto del prodotto pubblicato dall'agenzia United States Patent and Trademark Office)

Le alette possono influenzare inoltre l'aspetto visivo, in base allora loro disposizione (ordinata o più o meno casuale) e in abbinamento alla colorazione di base, porta all'effetto estetico desiderato dando l'impressione di avere superfici più o meno scabre in base alle diverse esigenze.

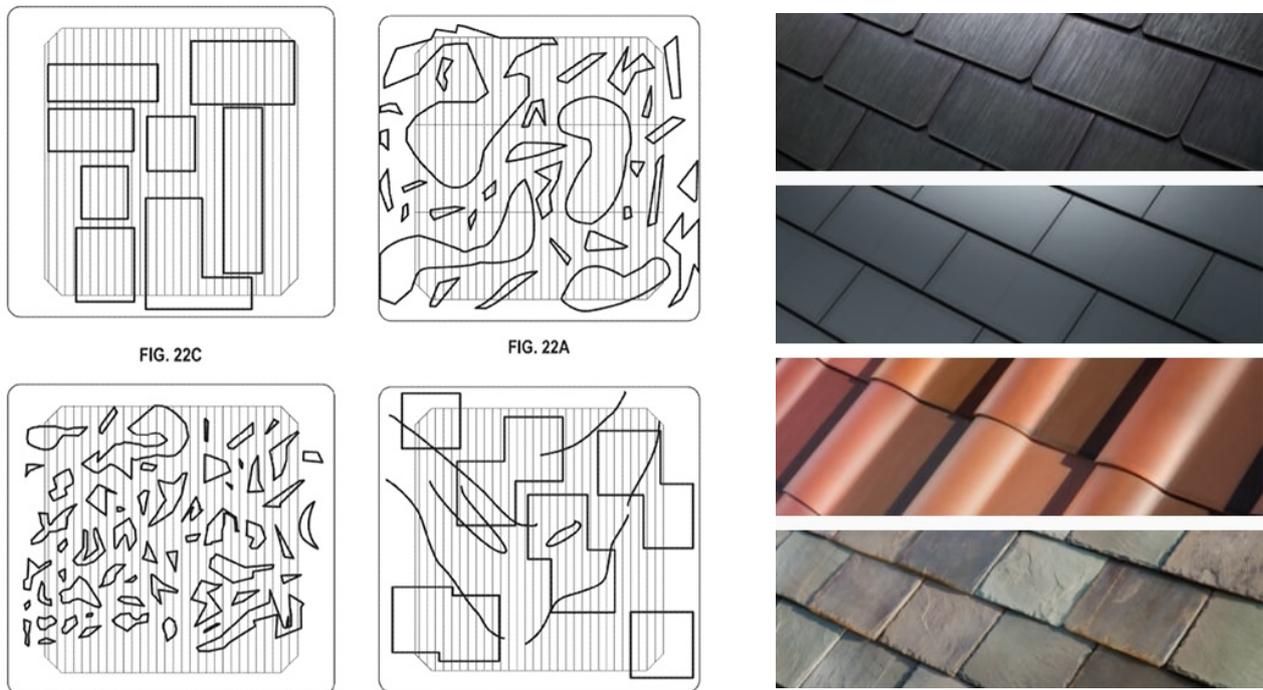


Figure 3.33 a sinistra Immagini dal brevetto del prodotto pubblicato dall'agenzia United States Patent and Trademark Office e a destra immagini delle diverse tegole fotovoltaiche prese dal sito di Tesla

Le tegole solari vengono fornite raggruppate in blocchi di tre e il cablaggio è nascosto sotto di esse. L'insieme delle tre tegole costituisce una tessera la quale viene montata su una cerniera.



Figure 3.34 tegole solari Tesla (fonte: advancedextrication.com)

3.5.3. Considerazioni economiche

La commercializzazione su larga scala di questo prodotto dovrebbe avviarsi nel 2019 (nel 2018 ci sono già state le prime installazioni anche se molto limitate) e il kit fornito dall'azienda sarà composto da tegole solari e tegole tradizionali (quindi un mix dei due tipi esteticamente identici dal piano strada) con mediamente il 35% costituito da tegole fotovoltaiche. Il prezzo delle tegole Solar Roof dovrebbe aggirarsi attorno ai 450 Dollari al m² (circa 400 euro) mentre per quelle tradizionali si scende a 120 Dollari. In media un kit potrebbe quindi costare sui 235 Dollari al m² (poco più di 200 euro). Rimangono comunque prezzi di massima e potrebbero in ogni caso cambiare per il mercato europeo. In sostanza il prodotto risulta essere abbastanza costoso, ma non bisogna comunque dimenticare che la robustezza delle tegole Tesla (fotovoltaiche e non), costituite da vetro temperato ad alta resistenza, assicura comunque una durabilità del prodotto nettamente superiore alle più classiche tegole o coppi in laterizio.

4. Confronto di un sistema OPV con un sistema al silicio cristallino

In questa sezione si vuole analizzare un sistema fotovoltaico organico (OPV) già esistente e tuttora in funzione con un sistema più tradizionale al silicio cristallino per capirne i diversi rendimenti energetici e in particolare cercare di dimostrare se effettivamente, a parità di potenza di picco installata (stessi kWp), il sistema OPV è davvero in grado di sfruttare meglio la radiazione solare (diretta, diffusa e riflessa) generando un quantitativo maggiore di energia elettrica.

L'impianto oggetto dell'indagine, già citato in precedenza tra gli esempi di BIOPV si trova a Dresda in Germania ed è collocato all'interno di una facciata vetrata proprio nella sede principale del produttore della tecnologia organica (Heliatek).



Figura 4.1 Vista della vetrata in cui sono stati implementati i moduli organici racchiusi all'interno dei pannelli di vetro (fonte: www.heliatek.com)

Di sotto vengono estrapolate delle immagini prese da Google Maps per meglio inquadrare la posizione del sistema fotovoltaico, si può facilmente notare come l'orientamento non sia uno dei più favorevoli (esposizione a nord-est: -96°) per la massimizzazione della produzione energetica. La scelta apparentemente insolita dell'orientamento, aggravata anche dall'inclinazione quasi verticale (80°) del sistema che comporta un'ulteriore perdita energetica, è appositamente voluta dall'azienda per studiare la resa energetica della tecnologia fotovoltaica basata sui composti organici anche in condizioni particolarmente sfavorevoli di orientamento e inclinazione.



Figure 4.2 immagini prese da Google Maps (sinistra e sopra a destra),
vista del sistema fotovoltaico a film organico (in basso a destra, fonte: www.heliatek.com)

4.1. Sunny Portal

Il sistema organico è monitorato 24 ore su 24 e i suoi dati vengono raccolti e resi disponibili al pubblico tramite il sito Sunny Portal. Questo portale è un servizio web della SMA Solar Technology AG (società tedesca che produce apparecchi per l'energia solare tra cui inverter connessi in rete) che consente di memorizzare pagine web relative ai vari impianti fotovoltaici, dalle quali è possibile visualizzare i dati dei vari sistemi in ogni momento e in ogni parte del mondo in cui ci si trovi. I dati del sistema vengono rilevati con un datalogger (apparecchio per la registrazione di dati) e inviati a Sunny Portal mediante il servizio web (Sunny WebBox). Chi vuole può rendere di dominio pubblico il proprio impianto fotovoltaico in modo da poter divulgare i propri dati a chiunque volesse analizzarli o confrontarli con altri sistemi (scelta fatta dalla società Heliatek per il proprio impianto solare). Il portale offre numerose funzioni per il controllo e la visualizzazione dell'impianto fotovoltaico come ad esempio: informazioni sull'impianto (es: rendimento, potenza max., abbattimento CO₂), rappresentazione dei dati dell'impianto in diagrammi e tabelle, possibilità di inserire le immagini del proprio impianto.

Le schermate seguenti mostrano delle pagine web estrapolate direttamente dal sito di Sunny Portal in cui nella prima vengono mostrati dati riferiti all'impianto come la posizione, la potenza di picco installata, l'azimuth e inclinazione mentre nella seconda viene invece mostrato un esempio della potenza prodotta dal sistema durante una giornata e l'energia prodotta durante un intero mese.

Heliatek-Fassade Dresden Profilo dell'impianto

Ubicazione: Dresden, Germania
Gestore: Heliatek GmbH
Messa in servizio: 09/09/2014

Potenza dell'impianto: 0,962 kWp
Produzione annuale: circa 374 kWh (389 kWh/kWp)
Abbattimento CO2: circa 0,3 tonnellate all'anno

Moduli: 80 x Heliatek HeliFilm 1000
Azimut: -96°
Angolo d'inclinazione: 80°
Comunicazione: Sunny WebBox
Inverter: Sunny Boy 1300TL-10
Sensori: Sunny Sensorbox



Descrizione:

La prima installazione di BIPV nell'edificio aziendale di Heliatek a Dresda HeliFilm® è stata installata nella sede di Dresda di Heliatek. È stato laminato in vetro da AGC Glass Europe, la filiale europea di AGC (il più grande produttore mondiale di vetro piano) e un partner commerciale strategico di lungo periodo di Heliatek.

Sviluppo di vetro solare attivo

- > Integrazione di HeliFilm® in lastre di vetro piano
- > Orientamento nord-orientale
- > Realizzato a settembre 2014
- > 1 kWp di capacità installata
- > Esistenza di una significativa raccolta di energia dimostrata
- > Energia utilizzata al 100% internamente

Figura 4.3 Schermata web di Sunny Portal che illustra l'impianto analizzato

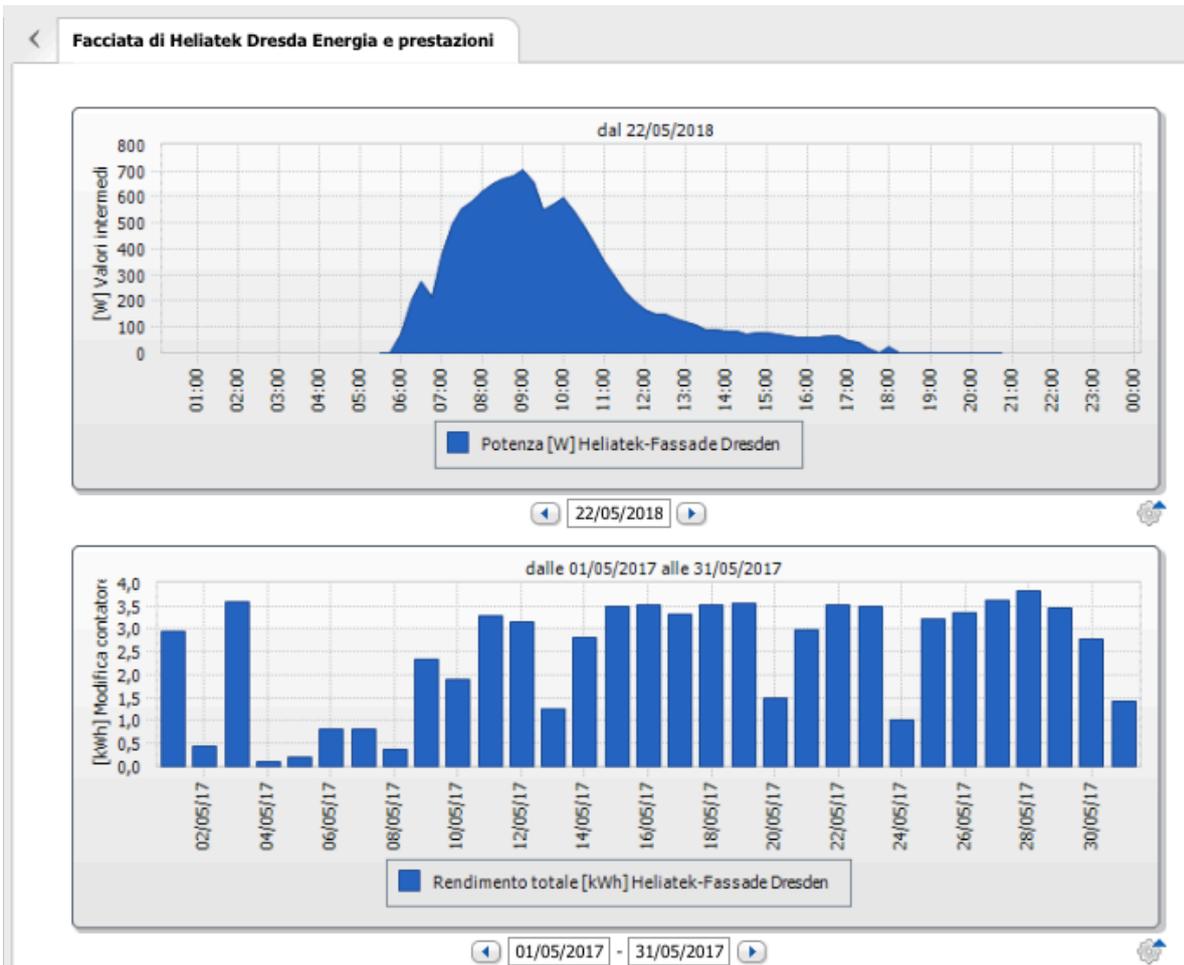
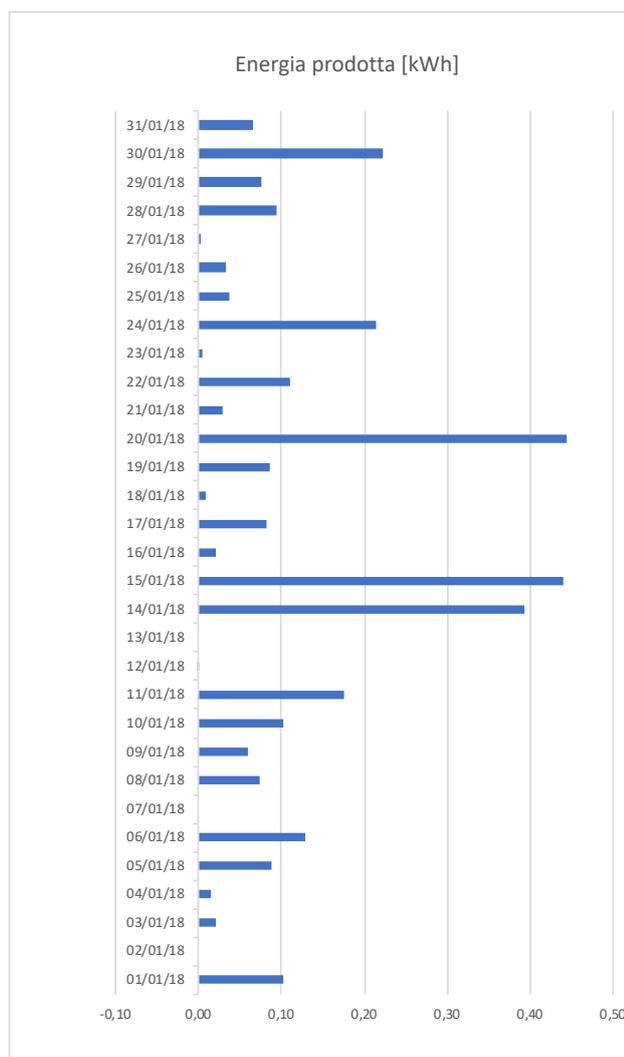


Figura 3.4 schermata web di Sunny Portal che mostra la produzione di energia del sistema in un giorno e mese dato

Nel seguito verranno illustrati in tabelle (con associato il relativo grafico) i valori dell'energia prodotta dal sistema OPV nei vari mesi di tutto il 2018. Sotto ogni tabella viene poi indicata la media giornaliera di energia prodotta nel dato mese e l'energia totale prodotta nell'interno mese, entrambi i valori sono espressi in kWh.

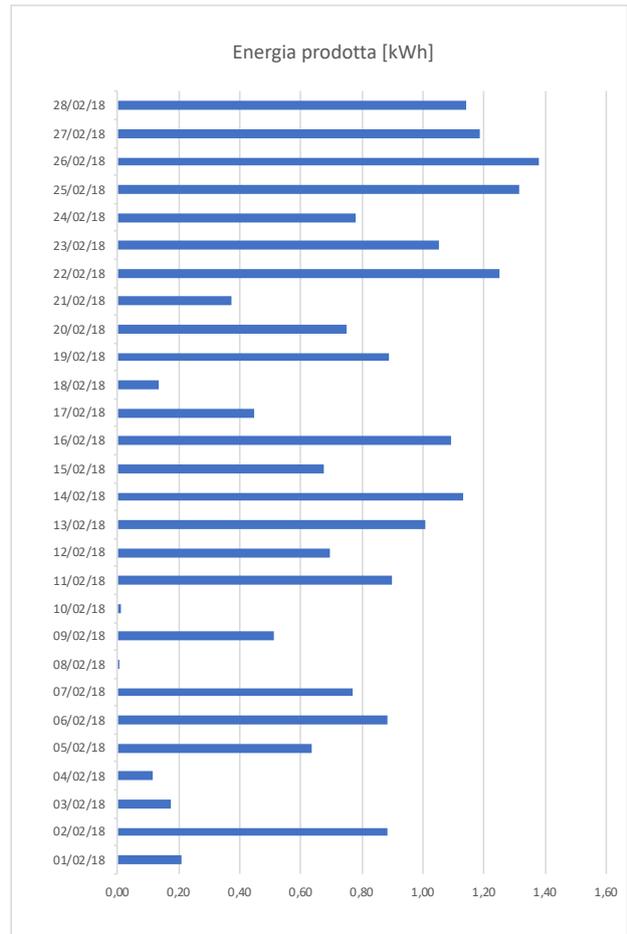
GENNAIO	
giorno	energia prodotta [kWh]
01/01/18	0,10
02/01/18	0,00
03/01/18	0,02
04/01/18	0,02
05/01/18	0,09
06/01/18	0,13
07/01/18	0,00
08/01/18	0,07
09/01/18	0,06
10/01/18	0,10
11/01/18	0,18
12/01/18	0,00
13/01/18	0,00
14/01/18	0,39
15/01/18	0,44
16/01/18	0,02
17/01/18	0,08
18/01/18	0,01
19/01/18	0,09
20/01/18	0,44
21/01/18	0,03
22/01/18	0,11
23/01/18	0,01
24/01/18	0,22
25/01/18	0,04
26/01/18	0,03
27/01/18	0,00
28/01/18	0,10
29/01/18	0,08
30/01/18	0,22
31/01/18	0,07
E tot [kWh]	3,14
E media [kWh]	0,10



Building Integrated Photovoltaics (BIPV). Soluzioni innovative e confronto con tecnologie convenzionali

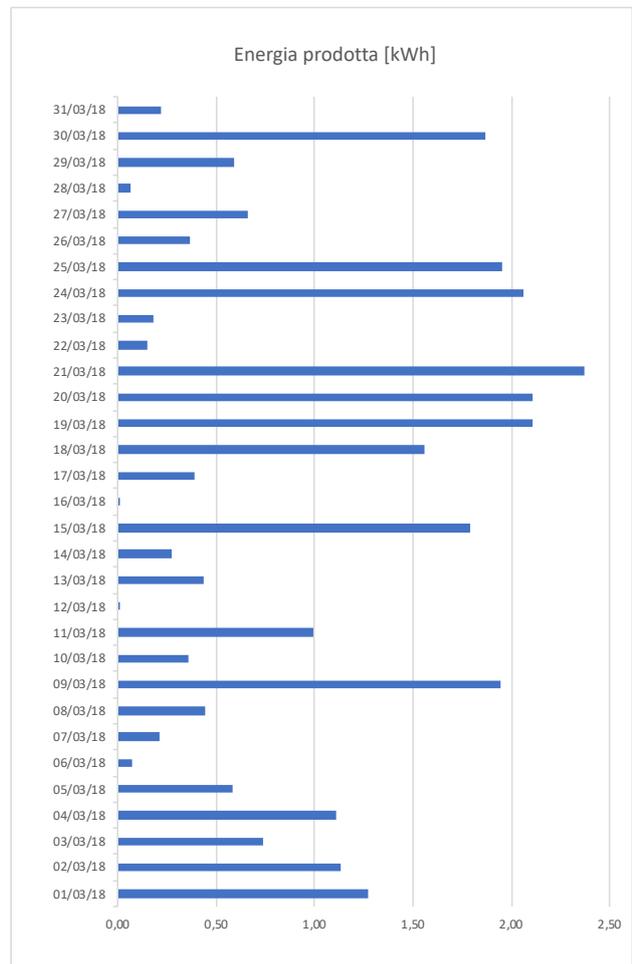
FEBBRAIO	
giorno	energia prodotta [kWh]
01/02/18	0,21
02/02/18	0,88
03/02/18	0,17
04/02/18	0,11
05/02/18	0,64
06/02/18	0,88
07/02/18	0,77
08/02/18	0,01
09/02/18	0,51
10/02/18	0,01
11/02/18	0,90
12/02/18	0,70
13/02/18	1,01
14/02/18	1,13
15/02/18	0,67
16/02/18	1,09
17/02/18	0,45
18/02/18	0,13
19/02/18	0,89
20/02/18	0,75
21/02/18	0,37
22/02/18	1,25
23/02/18	1,05
24/02/18	0,78
25/02/18	1,32
26/02/18	1,38
27/02/18	1,19
28/02/18	1,14

E tot [kWh]	20,38
E media [kWh]	0,73



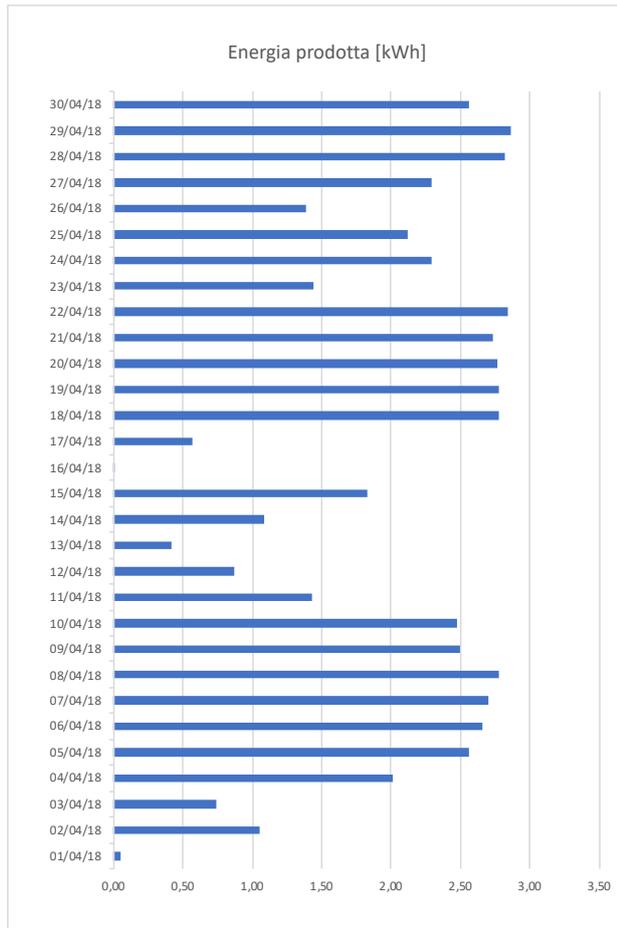
MARZO	
giorno	energia prodotta [kWh]
01/03/18	1,27
02/03/18	1,13
03/03/18	0,73
04/03/18	1,11
05/03/18	0,58
06/03/18	0,07
07/03/18	0,21
08/03/18	0,45
09/03/18	1,94
10/03/18	0,36
11/03/18	0,99
12/03/18	0,00
13/03/18	0,44
14/03/18	0,27
15/03/18	1,79
16/03/18	0,01
17/03/18	0,39
18/03/18	1,56
19/03/18	2,11
20/03/18	2,11
21/03/18	2,37
22/03/18	0,15
23/03/18	0,18
24/03/18	2,06
25/03/18	1,95
26/03/18	0,37
27/03/18	0,66
28/03/18	0,06
29/03/18	0,59
30/03/18	1,87
31/03/18	0,22

E tot [kWh]	27,99
E media [kWh]	0,90

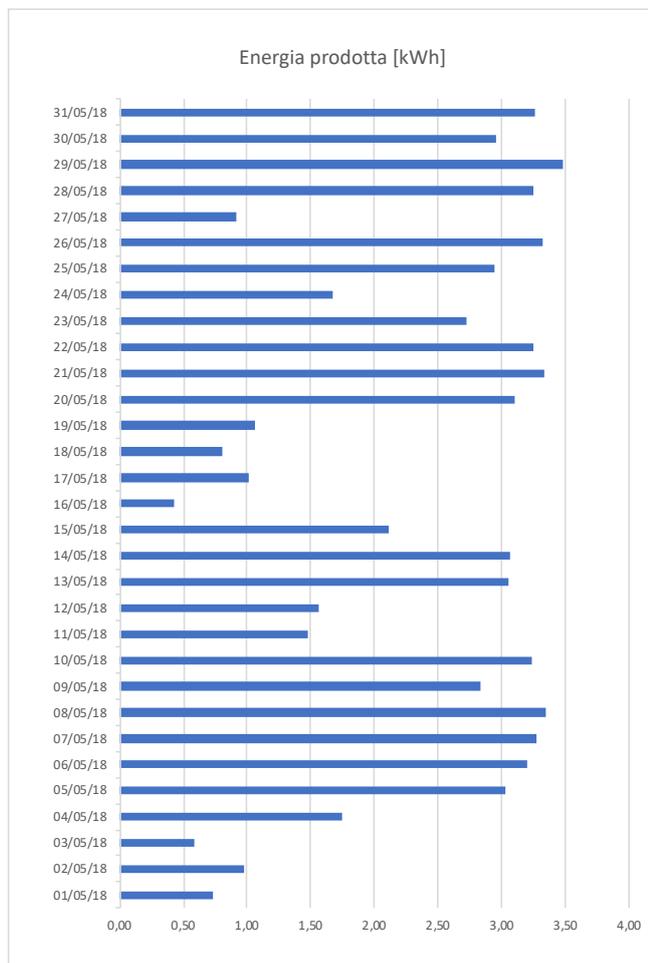


Building Integrated Photovoltaics (BIPV). Soluzioni innovative e confronto con tecnologie convenzionali

APRILE	
giorno	energia prodotta [kWh]
01/04/18	0,06
02/04/18	1,06
03/04/18	0,74
04/04/18	2,01
05/04/18	2,57
06/04/18	2,66
07/04/18	2,70
08/04/18	2,78
09/04/18	2,49
10/04/18	2,47
11/04/18	1,43
12/04/18	0,87
13/04/18	0,42
14/04/18	1,08
15/04/18	1,83
16/04/18	0,01
17/04/18	0,57
18/04/18	2,77
19/04/18	2,78
20/04/18	2,76
21/04/18	2,73
22/04/18	2,84
23/04/18	1,44
24/04/18	2,29
25/04/18	2,12
26/04/18	1,38
27/04/18	2,29
28/04/18	2,82
29/04/18	2,87
30/04/18	2,56
E tot [kWh] 57,38	
E media [kWh] 1,91	



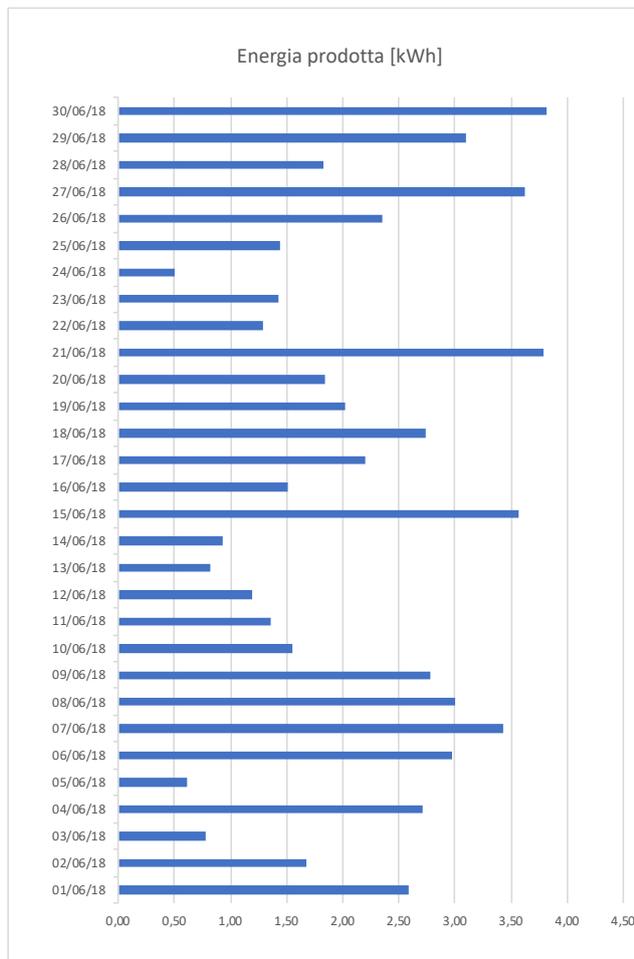
MAGGIO	
giorno	energia prodotta [kWh]
01/05/18	0,74
02/05/18	0,98
03/05/18	0,59
04/05/18	1,75
05/05/18	3,02
06/05/18	3,20
07/05/18	3,27
08/05/18	3,35
09/05/18	2,83
10/05/18	3,24
11/05/18	1,48
12/05/18	1,57
13/05/18	3,06
14/05/18	3,07
15/05/18	2,12
16/05/18	0,43
17/05/18	1,01
18/05/18	0,80
19/05/18	1,06
20/05/18	3,10
21/05/18	3,33
22/05/18	3,25
23/05/18	2,72
24/05/18	1,67
25/05/18	2,94
26/05/18	3,32
27/05/18	0,91
28/05/18	3,25
29/05/18	3,48
30/05/18	2,95
31/05/18	3,27
E tot [kWh] 71,72	
E media [kWh] 2,31	



Building Integrated Photovoltaics (BIPV). Soluzioni innovative e confronto con tecnologie convenzionali

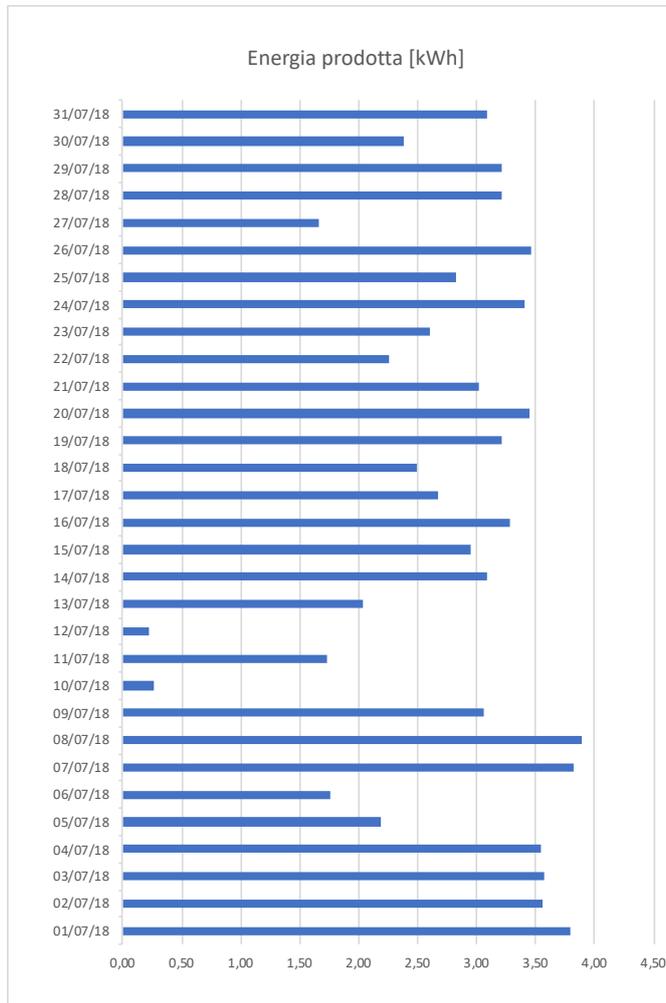
GIUGNO	
giorno	energia prodotta [kWh]
01/06/18	2,59
02/06/18	1,68
03/06/18	0,78
04/06/18	2,71
05/06/18	0,61
06/06/18	2,97
07/06/18	3,43
08/06/18	3,00
09/06/18	2,78
10/06/18	1,55
11/06/18	1,36
12/06/18	1,19
13/06/18	0,82
14/06/18	0,92
15/06/18	3,56
16/06/18	1,50
17/06/18	2,20
18/06/18	2,73
19/06/18	2,03
20/06/18	1,85
21/06/18	3,79
22/06/18	1,29
23/06/18	1,43
24/06/18	0,51
25/06/18	1,45
26/06/18	2,35
27/06/18	3,63
28/06/18	1,83
29/06/18	3,09
30/06/18	3,82

E tot [kWh]	63,44
E media [kWh]	2,11

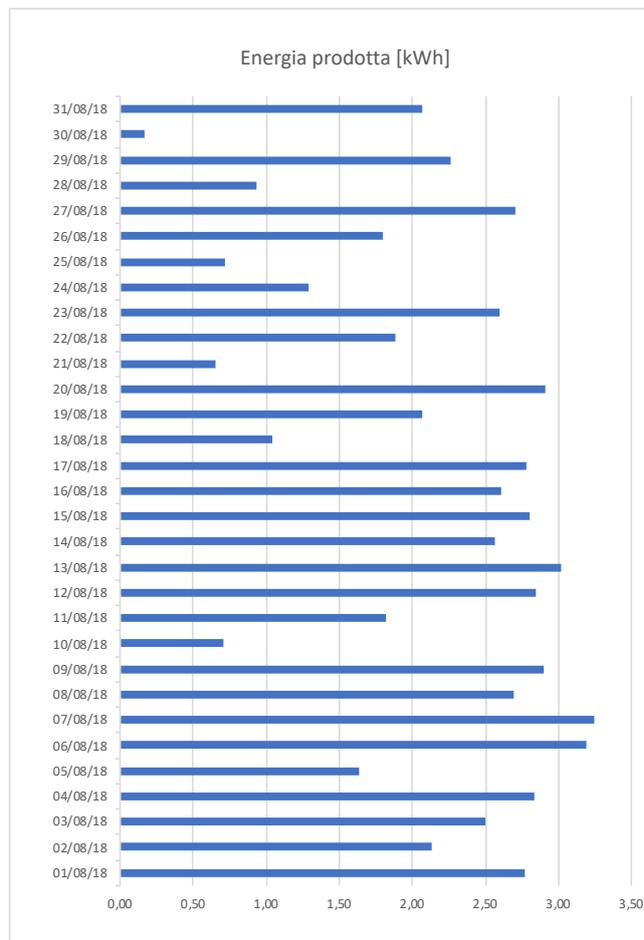


LUGLIO	
giorno	energia prodotta [kWh]
01/07/18	3,79
02/07/18	3,56
03/07/18	3,57
04/07/18	3,55
05/07/18	2,19
06/07/18	1,76
07/07/18	3,82
08/07/18	3,89
09/07/18	3,07
10/07/18	0,27
11/07/18	1,73
12/07/18	0,23
13/07/18	2,03
14/07/18	3,08
15/07/18	2,95
16/07/18	3,28
17/07/18	2,68
18/07/18	2,50
19/07/18	3,21
20/07/18	3,45
21/07/18	3,01
22/07/18	2,26
23/07/18	2,61
24/07/18	3,41
25/07/18	2,83
26/07/18	3,46
27/07/18	1,66
28/07/18	3,22
29/07/18	3,21
30/07/18	2,39
31/07/18	3,09

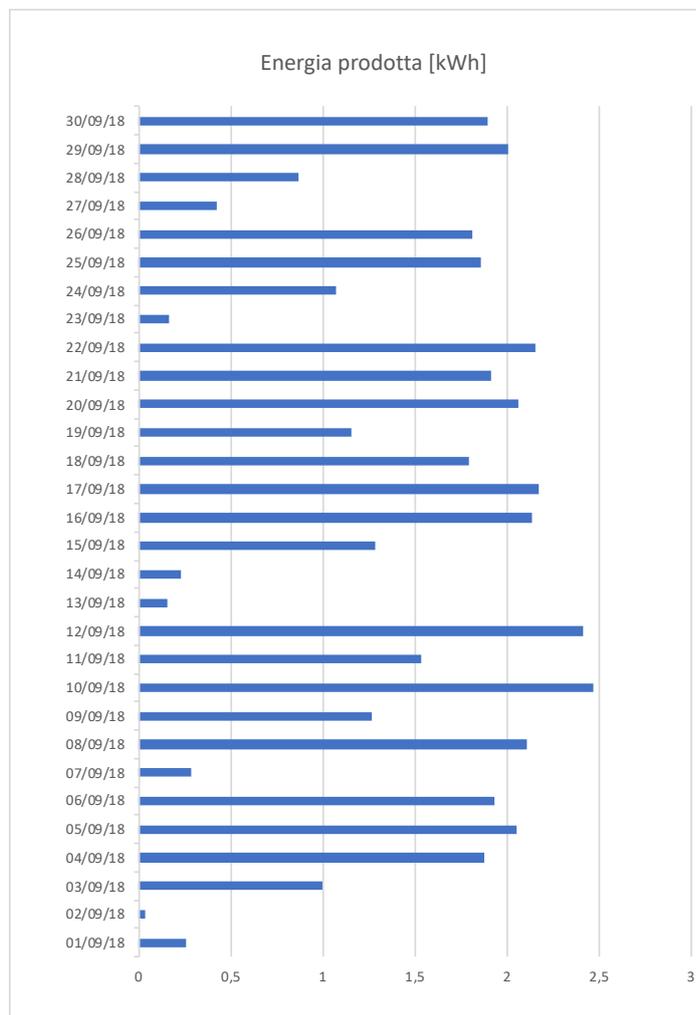
E tot [kWh]	85,71
E media [kWh]	2,76



AGOSTO	
giorno	energia prodotta [kWh]
01/08/18	2,77
02/08/18	2,13
03/08/18	2,50
04/08/18	2,84
05/08/18	1,64
06/08/18	3,19
07/08/18	3,24
08/08/18	2,69
09/08/18	2,90
10/08/18	0,70
11/08/18	1,82
12/08/18	2,85
13/08/18	3,02
14/08/18	2,56
15/08/18	2,80
16/08/18	2,61
17/08/18	2,78
18/08/18	1,04
19/08/18	2,07
20/08/18	2,91
21/08/18	0,65
22/08/18	1,88
23/08/18	2,59
24/08/18	1,29
25/08/18	0,71
26/08/18	1,80
27/08/18	2,70
28/08/18	0,93
29/08/18	2,26
30/08/18	0,16
31/08/18	2,07
E tot [kWh]	66,10
E media [kWh]	2,13

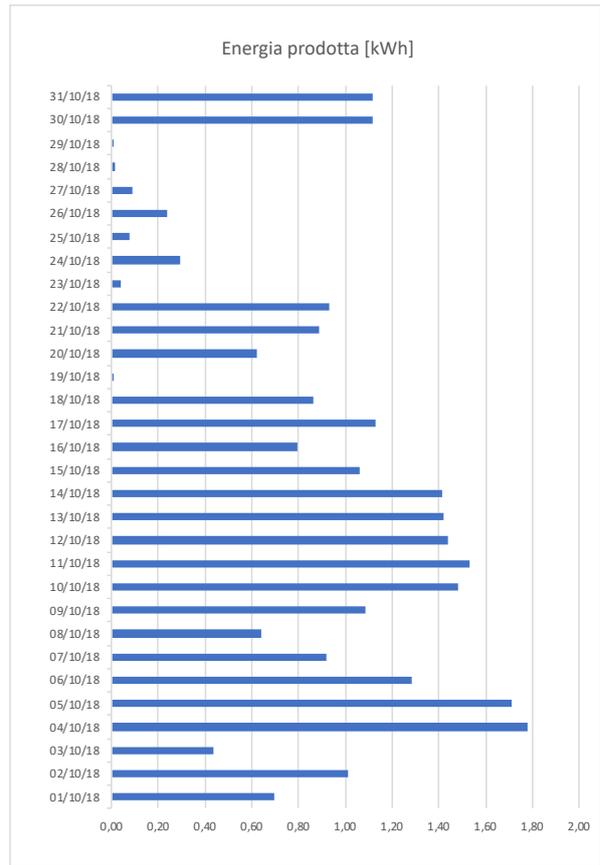


SETTEMBRE	
giorno	energia prodotta [kWh]
01/09/18	0,262
02/09/18	0,035
03/09/18	0,994
04/09/18	1,879
05/09/18	2,049
06/09/18	1,931
07/09/18	0,285
08/09/18	2,105
09/09/18	1,269
10/09/18	2,465
11/09/18	1,537
12/09/18	2,411
13/09/18	0,154
14/09/18	0,226
15/09/18	1,281
16/09/18	2,132
17/09/18	2,171
18/09/18	1,794
19/09/18	1,155
20/09/18	2,06
21/09/18	1,91
22/09/18	2,154
23/09/18	0,162
24/09/18	1,074
25/09/18	1,863
26/09/18	1,809
27/09/18	0,421
28/09/18	0,866
29/09/18	2,004
30/09/18	1,892
E tot [kWh]	42,35
E media [kWh]	1,41

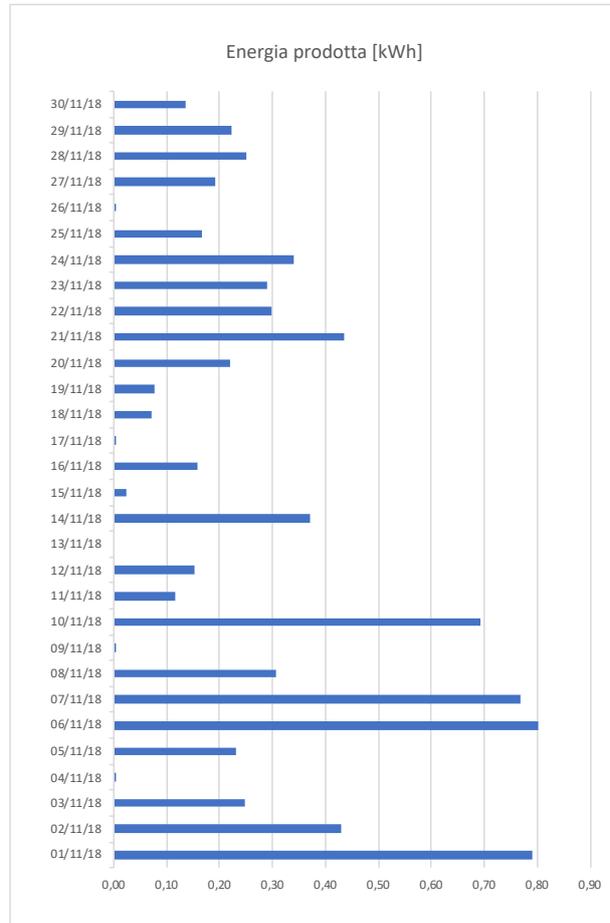


Building Integrated Photovoltaics (BIPV). Soluzioni innovative e confronto con tecnologie convenzionali

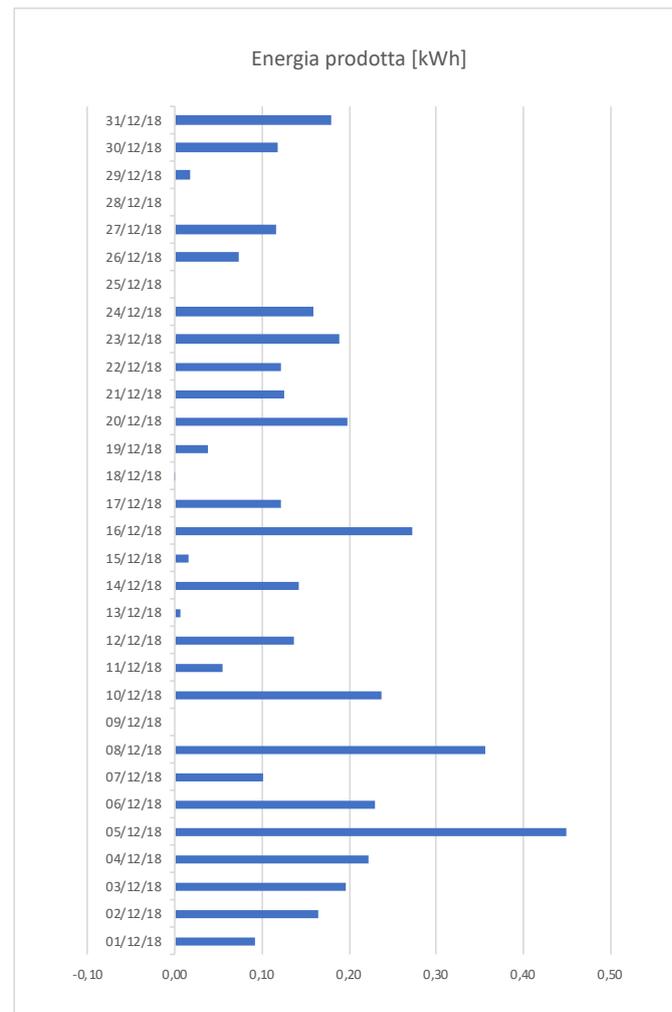
OTTOBRE	
giorno	energia prodotta [kWh]
01/10/18	0,69
02/10/18	1,01
03/10/18	0,44
04/10/18	1,78
05/10/18	1,71
06/10/18	1,28
07/10/18	0,92
08/10/18	0,64
09/10/18	1,09
10/10/18	1,48
11/10/18	1,53
12/10/18	1,44
13/10/18	1,42
14/10/18	1,42
15/10/18	1,06
16/10/18	0,80
17/10/18	1,13
18/10/18	0,86
19/10/18	0,00
20/10/18	0,62
21/10/18	0,89
22/10/18	0,93
23/10/18	0,04
24/10/18	0,30
25/10/18	0,08
26/10/18	0,24
27/10/18	0,09
28/10/18	0,01
29/10/18	0,00
30/10/18	1,11
31/10/18	1,12
E tot [kWh]	26,12
E media [kWh]	0,84



NOVENBRE	
giorno	energia prodotta [kWh]
01/11/18	0,79
02/11/18	0,43
03/11/18	0,25
04/11/18	0,01
05/11/18	0,23
06/11/18	0,80
07/11/18	0,77
08/11/18	0,31
09/11/18	0,00
10/11/18	0,69
11/11/18	0,12
12/11/18	0,15
13/11/18	0,00
14/11/18	0,37
15/11/18	0,02
16/11/18	0,16
17/11/18	0,01
18/11/18	0,07
19/11/18	0,08
20/11/18	0,22
21/11/18	0,43
22/11/18	0,30
23/11/18	0,29
24/11/18	0,34
25/11/18	0,17
26/11/18	0,00
27/11/18	0,19
28/11/18	0,25
29/11/18	0,22
30/11/18	0,14
E tot [kWh]	7,80
E media [kWh]	0,26



DICEMBRE	
giorno	energia prodotta [kWh]
01/12/18	0,09
02/12/18	0,16
03/12/18	0,20
04/12/18	0,22
05/12/18	0,45
06/12/18	0,23
07/12/18	0,10
08/12/18	0,36
09/12/18	0,00
10/12/18	0,24
11/12/18	0,06
12/12/18	0,14
13/12/18	0,01
14/12/18	0,14
15/12/18	0,02
16/12/18	0,27
17/12/18	0,12
18/12/18	0,00
19/12/18	0,04
20/12/18	0,20
21/12/18	0,13
22/12/18	0,12
23/12/18	0,19
24/12/18	0,16
25/12/18	0,00
26/12/18	0,07
27/12/18	0,12
28/12/18	0,00
29/12/18	0,02
30/12/18	0,12
31/12/18	0,18
E tot [kWh]	4,14
E media [kWh]	0,13



L'analisi voleva inizialmente confrontare i risultati ottenuti da questo sistema organico con un altro sistema reale nelle vicinanze che fosse il più simile possibile all'impianto OPV considerato almeno per quanto riguardasse l'angolo di tilt, l'orientamento e la posizione geografica. Ma a causa delle particolari condizioni di orientamento in cui si trova il sistema e della sua ridotta potenza di picco (meno di 1 kWp) unito al fatto di avere pochi impianti monitorati online da Sunny Portal resi disponibili al pubblico ha portato ad adoperare una strategia diversa.

Il confronto è stato eseguito tramite un simulatore online (PVGIS) di impianti fotovoltaici collocato nella stessa posizione dell'impianto organico con la stessa inclinazione e orientamento. Prima di illustrare la simulazione vera e propria viene esposta una breve descrizione del simulatore per una meglio comprensione da parte del lettore.

4.2. Simulatore PVGIS

Il PVGIS (PhotoVoltaic Geographical Information System) è un simulatore online gratuito messo a disposizione dall'Unione Europea realizzato tramite il centro comune di ricerca JRC (in inglese Joint Research Centre). Il compito del JRC è quello di fornire un appoggio scientifico e tecnico alla progettazione, allo sviluppo e all'attuazione delle politiche dell'Unione Europea. Tale servizio viene quindi direttamente finanziato da essa allo scopo di ottenere l'indipendenza della ricerca scientifica da singole politiche nazionali o interessi privati.

Il sistema PVGIS fornisce un database dell'energia solare in funzione della posizione geografica e permette di effettuare con rapidità un calcolo della produzione media di un impianto fotovoltaico basandosi su dati e tabelle attendibili. Questo strumento è considerato un buon indicatore dell'energia prodotta dal sistema fotovoltaico.

4.2.1. Dati di input

La simulazione effettuata risulta precisa e permette di inserire i parametri considerati essenziali per il calcolo del rendimento fotovoltaico. I principali input richiesti dal PVGIS sono i seguenti:

- località di installazione (inserendo un indirizzo, cliccando direttamente sulla mappa interattiva oppure impostando le coordinate: longitudine, latitudine)
- inclinazione o angolo di tilt (da 0° a 90°)
- orientamento o azimuth (da -180° a $+180^\circ$) es: sud = 0° est = -90° ovest = $+90^\circ$

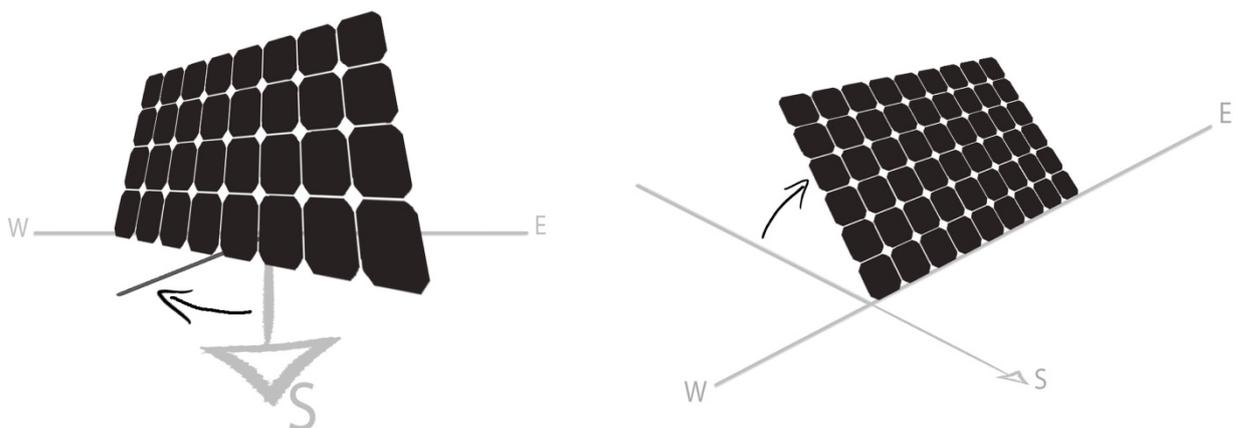


Figura 4.5 Azimuth a sinistra e angolo di tilt a destra (fonte: re.jrc.ec.europa.eu)

Nel caso del calcolo dell'efficienza dell'impianto il simulatore richiede ulteriori dati tra cui:

- database di radiazione :
 - Classic PVGIS (basato su dati calcolati a terra)
 - Climate-SAF PVGIS (basato su dati satellitari)
- tipo di tecnologia fotovoltaica
 - silicio cristallino
 - CIS
 - CdTe
- potenza di picco installata (espressa in kWp)
- stima di perdite di sistema (valore medio utilizzato: 14%)
- posizione di montaggio
 - integrato in un edificio
 - a terra

4.2.2. Dati di output

Il PVGIS prevede 3 possibili output in base alle esigenze richieste dall'utente:

- **Irradianza giornaliera:** Il risultato della ricerca è rappresentato da un elenco di orari che vanno dall'alba al tramonto del mese scelto con un intervallo di 15 minuti.
- **Irraggiamento mensile:** ottenuto mediante un'integrazione con l'irradianza giornaliera relativa a tutti i giorni del mese selezionato.
- **Calcolatore impianto fotovoltaico,** l'output produce per ogni mese:
 - produzione elettrica giornaliera media
 - produzione elettrica mensile media
 - media dell'irraggiamento giornaliero al m²
 - media dell'irraggiamento mensile al m²

Di sotto viene illustrata la schermata del simulatore PVGIS con i relativi dati impostati in maniera coerente al sistema reale. La posizione, come si può notare dall'immagine, coincide con la posizione reale del sistema installato sulla facciata del capannone. Sotto alla schermata del simulatore vengono illustrati i risultati ottenuti dalla simulazione.

Figura 4.6 schermata del simulatore online PVGIS

Rendimento di FV in rete

PVGIS stime di generazione elettricità solare

Luogo: 51°4'43" Nord, 13°41'40" Est, Quota: 114 m.s.l.m.,
Database di radiazione solare usato: PVGIS-classic

Potenza nominale del sistema FV: 1.0 kW (silicio cristallino)
Stime di perdita causata da temperatura e irradianza bassa: 12.6% (usando temperatura esterna locale)
Stima di perdita causata da effetti di riflessione: 4.0%
Altre perdite (cavi, inverter, ecc.): 14.0%
Perdite totali del sistema FV: 27.9%

Sistema fisso: inclinazione=80 gradi, orientamento=-96 gradi				
Mese	Ed	Em	Hd	Hm
Gen	0.31	9.72	0.46	14.3
Feb	0.64	18.0	0.90	25.1
Mar	1.08	33.5	1.50	46.4
Apr	1.63	49.0	2.31	69.4
Mag	2.08	64.4	2.99	92.7
Giu	1.99	59.8	2.93	87.9
Lug	2.02	62.7	3.00	93.0
Ago	1.77	54.7	2.60	80.7
Set	1.22	36.6	1.76	52.9
Ott	0.82	25.6	1.18	36.7
Nov	0.35	10.5	0.52	15.7
Dic	0.21	6.52	0.33	10.2
Anno	1.18	35.9	1.71	52.1
Totale per l'anno		431		625

Ed: Produzione elettrica media giornaliera dal sistema indicata (kWh)

Em: Produzione elettrica media mensile dal sistema indicata (kWh)

Hd: Media dell'irraggiamento giornaliero al metro quadro ricevuto dai pannelli del sistema (kWh/m2)

Hm: Media dell'irraggiamento al metro quadro ricevuto dai pannelli del sistema (kWh/m2)

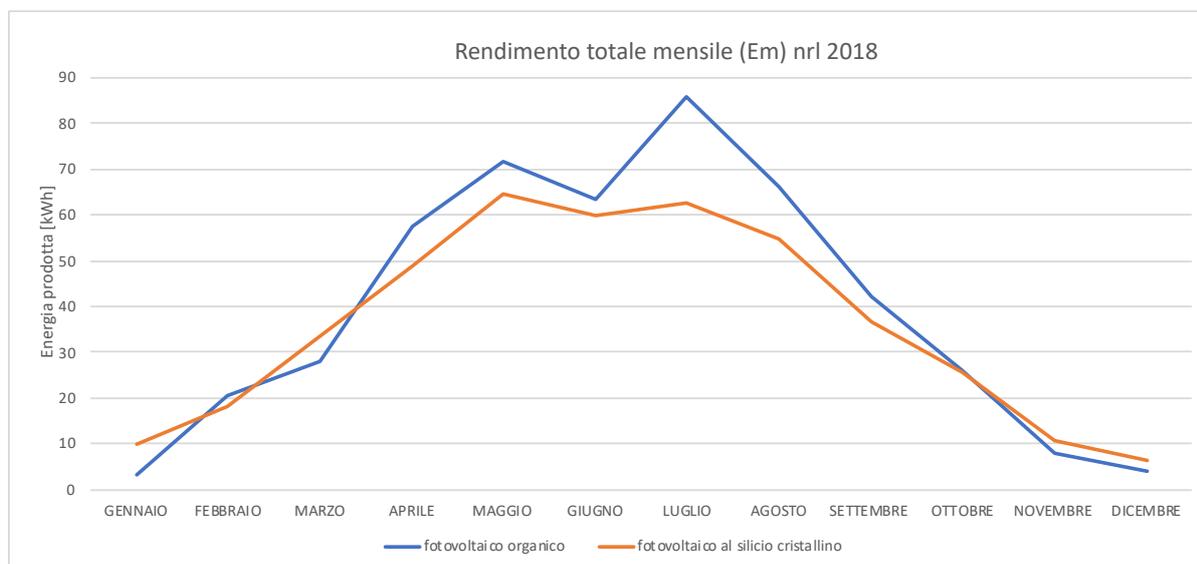
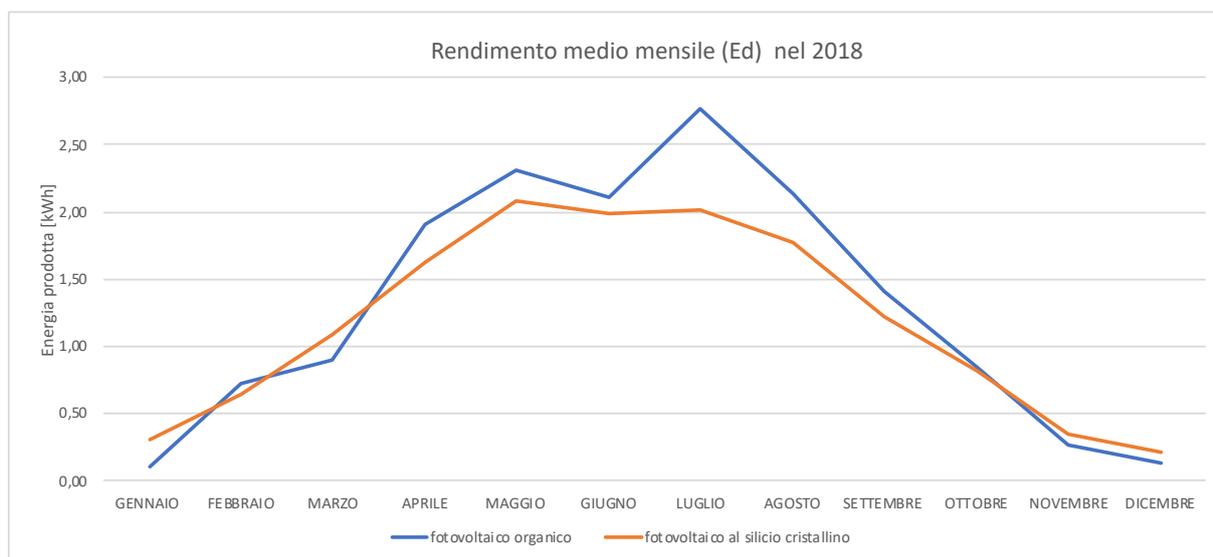
Figura 4.7 risultati ottenuti dal simulatore

4.3. Analisi dei dati ottenuti

Confronto tra il sistema reale effettivamente in funzione nel 2018 e il sistema fittizio simulato:

Sistema reale: fotovoltaico organico		
	Ed [kWh]	Em [kWh]
GENNAIO	0,10	3,14
FEBBRAIO	0,73	20,38
MARZO	0,90	27,99
APRILE	1,91	57,38
MAGGIO	2,31	71,72
GIUGNO	2,11	63,44
LUGLIO	2,76	85,71
AGOSTO	2,13	66,10
SETTEMBRE	1,41	42,35
OTTOBRE	0,84	26,12
NOVEMBRE	0,26	7,80
DICEMBRE	0,13	4,14
Energia prodotta in totale [kWh]		476,28

Sistema simulato: fotovoltaico silicio cristallino		
	Ed [kWh]	Em [kWh]
GENNAIO	0,31	9,72
FEBBRAIO	0,64	18,00
MARZO	1,08	33,50
APRILE	1,63	49,00
MAGGIO	2,08	64,40
GIUGNO	1,99	59,80
LUGLIO	2,02	62,70
AGOSTO	1,77	54,70
SETTEMBRE	1,22	36,60
OTTOBRE	0,82	25,60
NOVEMBRE	0,35	10,50
DICEMBRE	0,21	6,52
Energia prodotta in totale [kWh]		431,04

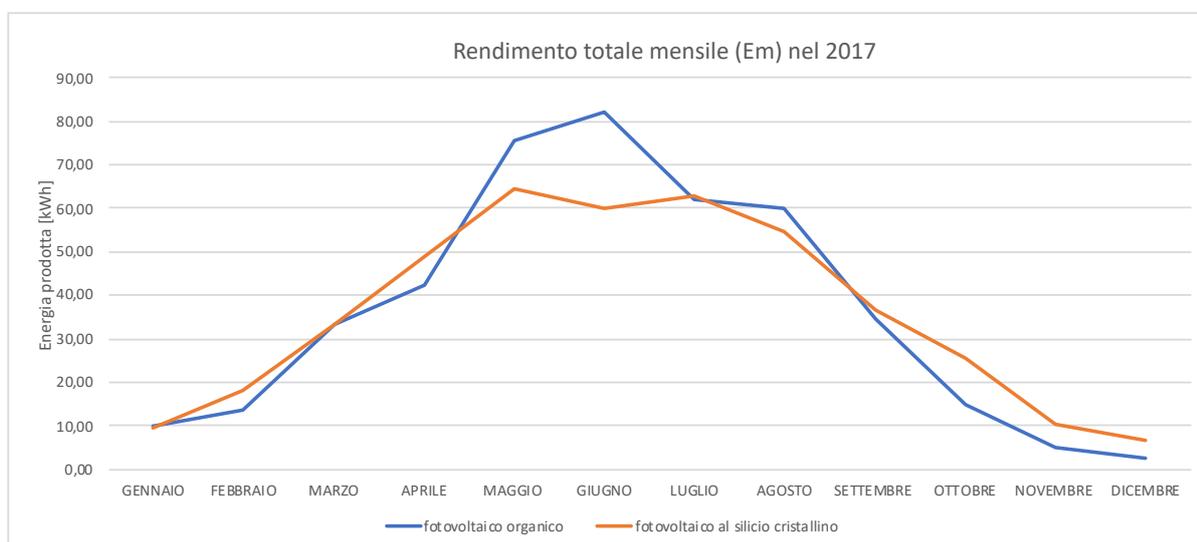
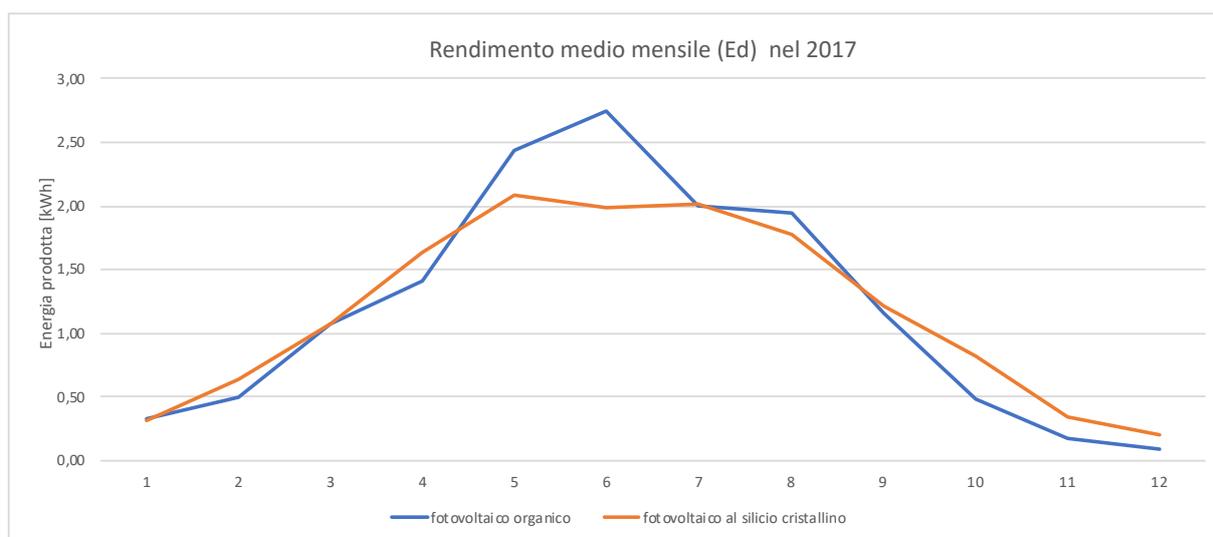


Nel seguito vengono mostrati i valori di energia prodotta in altri anni dal sistema organico (2017, 2016 e 2015) sempre confrontati con il sistema simulato al silicio cristallino, per motivi di sintesi vengono proposti direttamente i risultati finali senza mostrare in maniera dettagliata i valori di energia prodotta durante i vari singoli giorni nei diversi mesi.

Confronto tra il sistema reale effettivamente in funzione nel 2017 e il sistema fittizio simulato:

Sistema reale: fotovoltaico organico		
	Ed [kWh]	Em [kWh]
GENNAIO	0,33	10,10
FEBBRAIO	0,49	13,82
MARZO	1,07	33,29
APRILE	1,42	42,46
MAGGIO	2,44	75,65
GIUGNO	2,74	82,31
LUGLIO	2,00	61,85
AGOSTO	1,94	60,17
SETTEMBRE	1,16	34,75
OTTOBRE	0,48	14,89
NOVEMBRE	0,17	5,21
DICEMBRE	0,09	2,65
Energia prodotta in totale [kWh]	437,15	

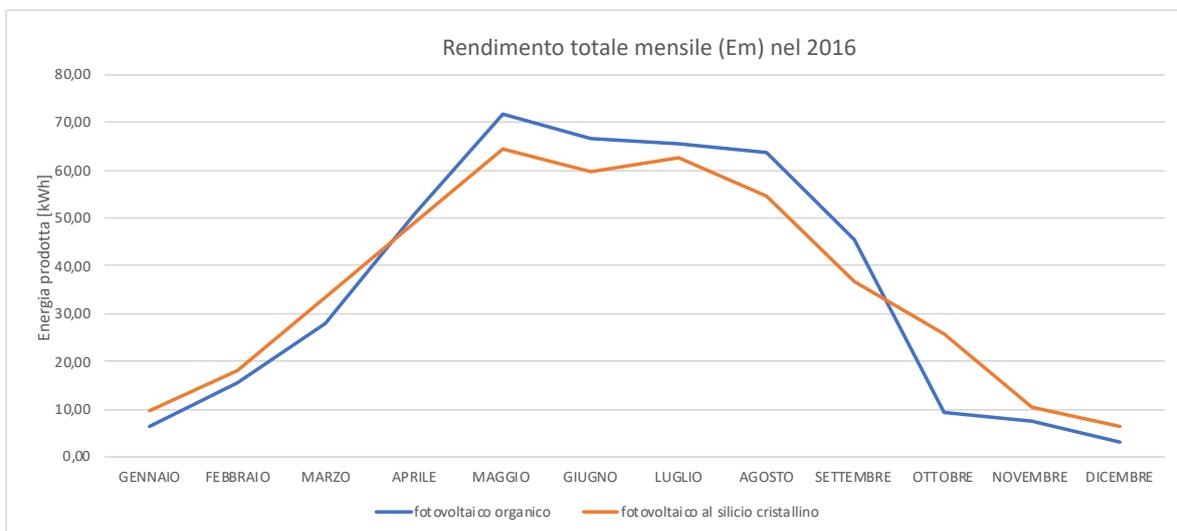
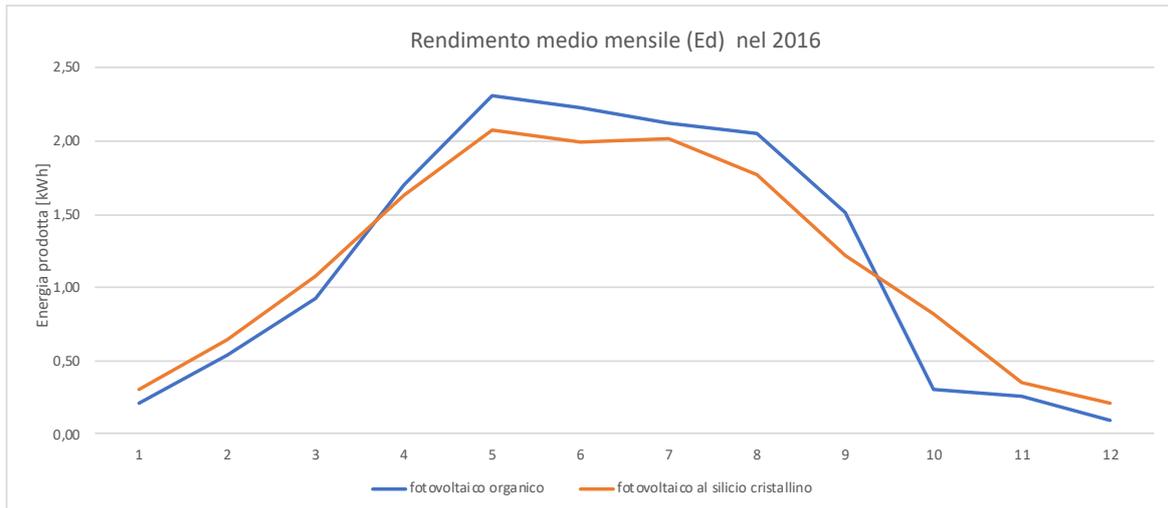
Sistema simulato: fotovoltaico silicio cristallino		
	Ed [kWh]	Em [kWh]
GENNAIO	0,31	9,72
FEBBRAIO	0,64	18,00
MARZO	1,08	33,50
APRILE	1,63	49,00
MAGGIO	2,08	64,40
GIUGNO	1,99	59,80
LUGLIO	2,02	62,70
AGOSTO	1,77	54,70
SETTEMBRE	1,22	36,60
OTTOBRE	0,82	25,60
NOVEMBRE	0,35	10,50
DICEMBRE	0,21	6,52
Energia prodotta in totale [kWh]	431,04	



Confronto tra il sistema reale effettivamente in funzione nel 2016 e il sistema fittizio simulato:

Sistema reale: fotovoltaico organico		
	Ed [kWh]	Em [kWh]
GENNAIO	0,21	6,44
FEBBRAIO	0,53	15,467
MARZO	0,93	27,892
APRILE	1,69	50,846
MAGGIO	2,31	71,71
GIUGNO	2,22	66,687
LUGLIO	2,12	65,659
AGOSTO	2,05	63,554
SETTEMBRE	1,51	45,3
OTTOBRE	0,30	9,298
NOVEMBRE	0,25	7,618
DICEMBRE	0,10	3,056
Energia prodotta in totale [kWh]		433,53

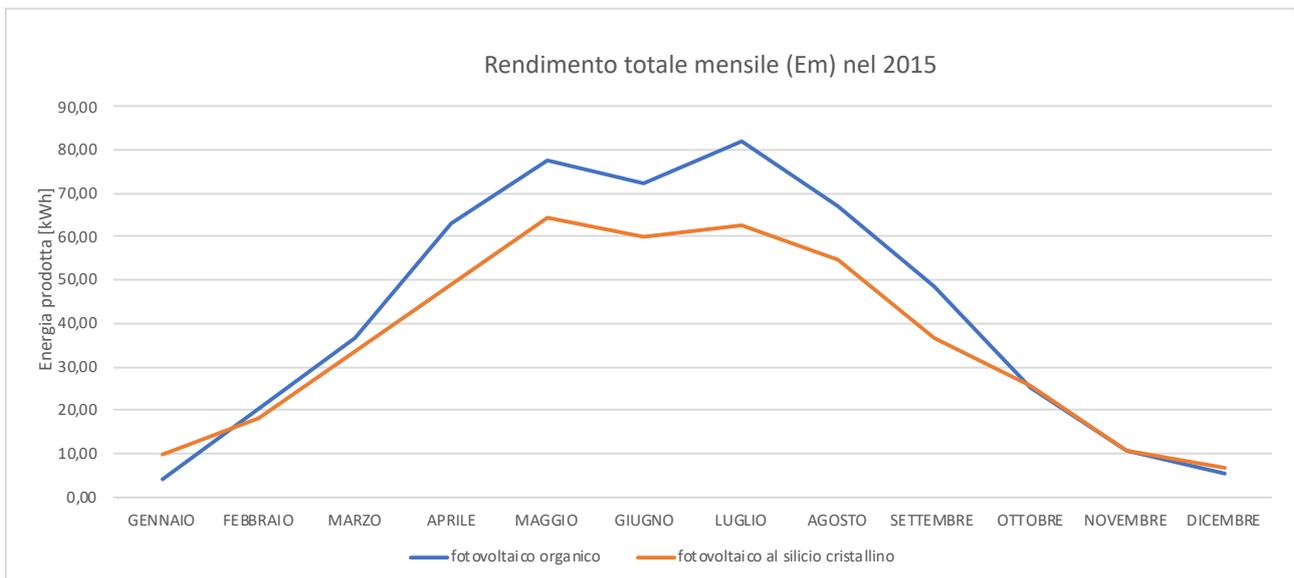
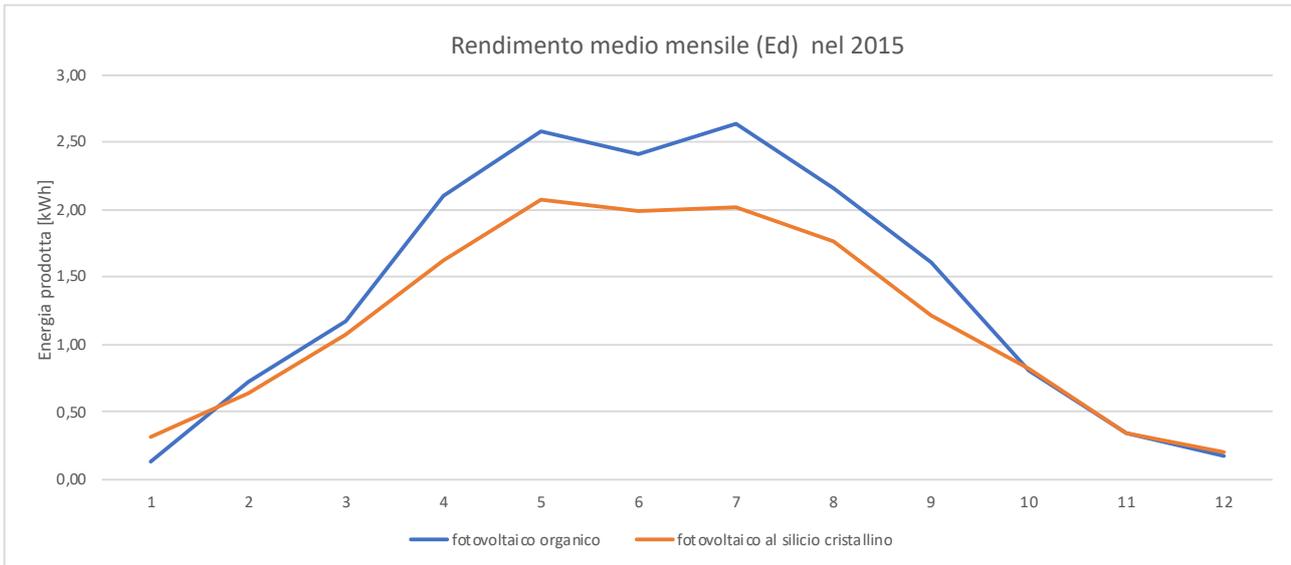
Sistema simulato: fotovoltaico silicio cristallino		
	Ed [kWh]	Em [kWh]
GENNAIO	0,31	9,72
FEBBRAIO	0,64	18,00
MARZO	1,08	33,50
APRILE	1,63	49,00
MAGGIO	2,08	64,40
GIUGNO	1,99	59,80
LUGLIO	2,02	62,70
AGOSTO	1,77	54,70
SETTEMBRE	1,22	36,60
OTTOBRE	0,82	25,60
NOVEMBRE	0,35	10,50
DICEMBRE	0,21	6,52
Energia prodotta in totale [kWh]		431,04



Confronto tra il sistema reale effettivamente in funzione nel 2015 e il sistema fittizio simulato:

Sistema reale: fotovoltaico organico		
	Ed [kWh]	Em [kWh]
GENNAIO	0,14	4,22
FEBBRAIO	0,72	20,24
MARZO	1,18	36,56
APRILE	2,11	63,23
MAGGIO	2,58	77,52
GIUGNO	2,41	72,24
LUGLIO	2,64	81,84
AGOSTO	2,16	66,98
SETTEMBRE	1,62	48,47
OTTOBRE	0,81	25,06
NOVEMBRE	0,35	10,43
DICEMBRE	0,17	5,22
Energia prodotta in totale [kWh]		512,01

Sistema simulato: fotovoltaico silicio cristallino		
	Ed [kWh]	Em [kWh]
GENNAIO	0,31	9,72
FEBBRAIO	0,64	18,00
MARZO	1,08	33,50
APRILE	1,63	49,00
MAGGIO	2,08	64,40
GIUGNO	1,99	59,80
LUGLIO	2,02	62,70
AGOSTO	1,77	54,70
SETTEMBRE	1,22	36,60
OTTOBRE	0,82	25,60
NOVEMBRE	0,35	10,50
DICEMBRE	0,21	6,52
Energia prodotta in totale [kWh]		431,04



4.4. Sintesi dei risultati

I valori ottenuti, meglio evidenziati nei vari grafici, mostrano il buon risultato sperato. Si può vedere che il sistema al silicio cristallino collocato nella stessa posizione del sistema integrato BIOPV con lo stesso angolo di orientamento (-96°) e lo stesso angolo di tilt (80°) produce un quantitativo di energia inferiore a parità di potenza di picco installata (1 kWp) confermando quanto previsto dalle caratteristiche della nuova tecnologia basata sui composti organici. Il sistema a celle organiche riesce quindi a captare più radiazione solare di quanto possa fare un sistema al silicio cristallino. Anche se questi risultati non sono probatori poiché basati sui dati di un simulatore e quindi non di un sistema effettivamente reale comportano comunque una buona base di partenza, segno di una tecnologia nuova in grado di rivoluzionare davvero il settore del fotovoltaico integrato.

	Etot sistema organico [kWh]	Etot sistema simulato [kWh]	ΔE [kWh]
2018	476,28	431,04	45,24
2017	437,15	432,04	5,11
2016	433,53	433,04	0,49
2015	512,01	434,04	77,97

ΔE medio [kWh]	32,20
------------------------	-------

Conclusioni

Come mostrato all'interno del lavoro svolto, il settore del mercato fotovoltaico integrato negli edifici (BIPV) non farà altro che aumentare in maniera esponenziale nei prossimi anni avvenire. Per questo motivo nessun team di progettazione non potrà non pensare a queste tecnologie fin dalle prime fasi di ideazione di un progetto o anche nelle grandi ristrutturazioni di edifici esistenti.

In questo percorso si sono dunque volute mostrare le infinite possibilità di impiego del fotovoltaico all'interno dell'involucro edilizio in tutte le sue varianti fino ad entrare anche nel sistema del patrimonio edilizio storico. Al momento le tecnologie attuali come quelle al silicio cristallino o a film sottile permettono, come si è visto, di scegliere già tra numerose varianti di integrazione offrendo quindi una elevata flessibilità di impiego.

Tuttavia, le nuove tecnologie innovative, che presto entreranno a far parte del nostro uso comune, affiancheranno quelle convenzionali in modo da ampliare ulteriormente le possibilità d'impiego del fotovoltaico integrato. Si potrà dunque scegliere il sistema più adatto ad ogni singolo intervento per meglio integrarlo all'interno dell'involucro edilizio con prezzi sempre più vantaggiosi ed economici. La conoscenza di tutti questi sistemi di produzione energetica rinnovabile è ormai indispensabile per progettare con cura nuovi edifici che, dopo il primo obiettivo di diventare a consumo quasi nullo (NZEB) potranno in futuro diventare, grazie al continuo miglioramento dell'efficienza di conversione dei sistemi fotovoltaici, totalmente indipendenti da energia esterna (Zero Energy Building) fino ad arrivare addirittura alla realizzazione di edifici non più passivi ma in grado di autosostenersi e fornire energia ad altri sistemi (Positive Energy Building).

Bibliografia

Adami J., Maturi L., *Building Integrated Photovoltaic (BIPV) in Trentino Alto Adige*, Springer, 2018.

Andreolli F., *Fotovoltaico di nuova generazione – Guida alla progettazione e realizzazione*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, giugno 2013.

Bosisio P., Di Dio V., Scognamiglio A., *Fotovoltaico negli edifici – Dimensionamento, progettazione e gestione degli impianti*, Edizione Ambiente, 2013.

Ciriminna R., Pagliaro M., Palmisano G., *Il nuovo fotovoltaico – Dal film sottile alle celle a colorante*, Dario Flaccovio Editore, marzo 2009.

Ciriminna R., Pagliaro M., Palmisano G., *BIPV – Il fotovoltaico integrato nell'edilizia*, Dario Flaccovio Editore, luglio 2009.

Del Corno B., Mottura G., *L'integrazione architettonica dei sistemi solari e fotovoltaici*, Maggioli Editore, San Marino, marzo 2013.

De Nisco B., *Le scelte fotovoltaiche per l'edilizia abitativa - alla luce del IV Conto Energia*, Maggioli Editore, settembre 2011.

Keoma A., Zuppiroli M., *Energia e restauro – Il miglioramento dell'efficienza energetica in sistemi aggregati di edilizia pre-industriale tra istanze conservative e prestazionali*, FrancoAngeli, 2013.

Krippner R., *Building-Integrated Solar Technology – Architectural Design with photovoltaics and solar thermal energy*, Detail Green Books, Munich, 2017.

Mazzuchelli E. S., *Edifici ad energia quasi zero – Materiali, tecnologie e strategie progettuali per involucri e impianti innovativi ad alte prestazioni*, Maggioli Editore, San Marino, ottobre 2013.

Scudo G., *Tecnologie Solari integrate nell'architettura – Processi, strumenti, sistemi e Componenti*, Wolters Kluwer, 2013.

Sitografia

- <https://www.gse.it> (consultazione: novembre 2018)
- <https://www.enea.it> (consultazione: novembre 2018)
- <https://www.bipv.ch> (consultazione: novembre 2018)
- <https://www.tesla.com> (consultazione: dicembre 2018)
- <https://www.heliatek.com> (consultazione: dicembre 2018)
- <https://www.nanoflexpower.com> (consultazione dicembre 2018)
- <https://www.eniday.com> (consultazione: dicembre 2018)
- <https://www.eni.com> (consultazione: dicembre 2018)
- <https://www.glasstopower.com> (consultazione: dicembre 2018)
- <https://www.sunnyportal.com> (consultazione: febbraio 2018)
- <http://re.jrc.ec.europa.eu> (consultazione: febbraio 2018)
- <https://www.qualenergia.it> (consultazione: dicembre 2018)
- <http://task41.iea-shc.org> (consultazione: dicembre 2018)
- <https://www.fotovoltaico.news> (consultazione: novembre 2018)
- <http://www.rinnovabili.it> (consultazione: novembre 2018)
- <https://www.fotovoltaiconorditalia.it> (consultazione: novembre 2018)
- <https://www.generalmembrane.it> (consultazione: novembre 2018)
- <http://www.energoclub.org> (consultazione: gennaio 2019)
- <http://www.distrettoenergieinrinnovabili.it> (consultazione: gennaio 2019)
- <http://www.incentivifotovoltaico.name> (consultazione: gennaio 2019)
- <http://www.progettazionecasa.com> (consultazione: gennaio 2019)
- <http://www.consulente-energia.com> (consultazione: dicembre 2018)
- <https://www.sunpowercorp.it> (consultazione: dicembre 2018)

<http://www.nextville.it> (consultazione: dicembre 2018)

<https://net4energy> (consultazione: dicembre 2018)

<https://www.researchgate.net> (consultazione: dicembre 2018)

<https://www.architetturaecosostenibile.it> (consultazione: dicembre 2018)

<https://www.som.com> (consultazione: febbraio 2018)

<https://www.casaclima.com> (consultazione: febbraio 2018)

<http://www.rivistaponte.com> (consultazione: febbraio 2018)

<https://www.ntechresearch.com> (consultazione: dicembre 2018)

<http://www.architetto.info> (consultazione: dicembre 2018)

<http://www.fsnews.it> (consultazione: dicembre 2018)

<https://www.nature.com> (consultazione: dicembre 2018)

<https://www.solarcentury.com> (consultazione: dicembre 2018)

<http://www.pvdatabase.org> (consultazione: dicembre 2018)

