

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Dipartimento di ingegneria industriale

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

**Tesi di Laurea Triennale in
Ingegneria Gestionale**

IL FOTOVOLTAICO NELLE IMPRESE

Relatore: Prof. Mirto Mozzon
Correlatore: Dott. Augusto Tassan

Laureando: Davide Milani

ANNO ACCADEMICO 2015-2016

INDICE

Sommario.....	3
Introduzione.....	5
Ringraziamenti.....	9
1. Dalla luce l'elettricità.....	11
1.1. Sole.....	11
1.2. Radiazione solare al suolo.....	11
1.3. Celle fotovoltaiche.....	13
1.4. Conversione fotovoltaica.....	17
2. Componenti in un impianto fotovoltaico.....	23
2.1. Moduli fotovoltaici.....	23
2.2. Collegamenti elettrici.....	25
2.3. Cassetta di terminazione.....	26
2.4. Da modulo a campo.....	27
2.5. Sistema di accumulo (la batteria).....	28
2.6. Regolatori di carica.....	30
2.7. Inverter.....	30
2.8. Smaltimento e riciclaggio fotovoltaico.....	33
3. Principi di progettazione e realizzazione.....	35
3.1. Classificazione.....	35
3.2. Architettura industriale.....	36
3.3. Layout dell'impianto elettrico.....	39
4. Sicurezza, manutenzione e normative.....	41

4.1.	Sicurezza.....	41
4.2.	Le scariche atmosferiche.....	42
4.3.	Manutenzione.....	43
4.4.	Normativa e disposizioni legislative.....	44
4.4.1.	CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano).....	44
4.4.2.	CENELEC (Comitato Europeo di Normazione Elettrica).....	45
4.4.3.	IEC (Comitato Elettrotecnico Internazionale).....	45
5.	Valorizzazione dell'energia fotovoltaica ed analisi economico-finanziaria degli impianti.....	47
5.1.	Remunerazione.....	47
5.2.	Tariffa incentivante del conto energia.....	48
5.3.	Ritiro dedicato.....	49
5.4.	Analisi economico-finanziaria di un impianto di grande taglia.....	50
5.5.	Analisi di sensibilità sul TIR di progetto.....	51
6.	Attualità.....	53
6.1.	Innovazione e sostenibilità economica.....	53
6.2.	Chi offre soluzioni.....	54
6.3.	Chi ha agito.....	55
6.4.	Presiti e agevolazioni.....	57
	Conclusioni.....	59
	Bibliografia.....	61

SOMMARIO

Il primo capitolo riporta il percorso compiuto dall'energia solare durante il quale essa, tramite l'utilizzo di apposite celle elettriche, diviene energia elettrica.

Nel secondo capitolo viene quindi descritta la componentistica dell'impianto solare, il funzionamento di ciascun componente e in che modo i vari componenti interagiscano fra di loro ai fini della conversione fotovoltaica.

La disposizione e il posizionamento dell'impianto, il suo layout elettrico e le tipologie di impianti fotovoltaici create a partire da questi tre elementi sono trattati nel terzo capitolo con particolare attenzione all'architettura di tipo industriale.

Per completare l'aspetto di progettazione e realizzazione, nel quarto capitolo si riporta una sintesi riguardo la manutenzione, la sicurezza e le normative vigenti, soprattutto per gli impianti di tipo grid-connected.

Col quinto capitolo si abbandona l'ambito più tecnico/scientifico, per entrare nel merito degli aspetti di tipo economico-finanziario che caratterizzano un impianto, concedendo ampio spazio agli incentivi e alle remunerazioni concesse e riportando un esempio di analisi economico-finanziaria di un impianto di grande taglia.

Infine, il sesto e ultimo capitolo fornisce un panorama di quello che è oggi il ruolo del fotovoltaico nelle imprese, del rapporto tra chi offre e chi cerca soluzioni e di chi fornisce fondi per incentivare e favorire l'installazione di impianti fotovoltaici anche all'interno delle piccole e medie imprese.

INTRODUZIONE

Il sole è l'elemento vitale del nostro pianeta: si tratta di una stella costituita principalmente da idrogeno ed elio che genera una grande quantità di energia emessa sotto forma di radiazioni elettromagnetiche. Fin dall'antichità questa sfera 'gialla' è stata oggetto di ammirazione, studio e talvolta paura. Tuttavia è solo grazie ad esso che la vita è presente sulla terra.

A partire dalle civiltà più antiche il sole, oltre ad essere considerato una divinità, è stato sfruttato per la coltivazione di terreni grazie al suo calore e alla sua luce: inizialmente in modo rudimentale e successivamente, man mano che le popolazioni acquisivano conoscenze, seguendo il corso delle stagioni.

Oggi il potenziale di questa grandiosa stella viene utilizzato anche per la produzione di energia elettrica.

Le radiazioni solari, una volta arrivate sulla superficie terrestre, subiscono fenomeni di assorbimento e diffusione con intensità differente a seconda della regione che raggiungono, a causa dell'irregolarità del raggio terrestre che influenza la distanza sole-terra. L'"oscuro segreto" della conversione è celato nella luce: è, infatti, sfruttando l'effetto indotto da un flusso luminoso che investe un materiale semiconduttore, che la radiazione solare diviene energia elettrica. Ciò che rende possibile il tutto è la chimica e il mezzo sono gli elettroni che, spostandosi e saltando da una banda all'altra, grazie all'energia fotoelettrica (o termica) fornita dal sole, generano elettricità.

I materiali che permettono queste reazioni chimiche compongono la cella fotovoltaica che possiamo definire come l'unità base del modulo fotovoltaico: infatti, l'assemblaggio di più celle, una accanto all'altra, avviene posandole sopra un supporto rigido necessario per compensare la fragilità dei sottili cristalli impiegati; poi, l'impiego di ulteriori strati differenti, ciascuno con un suo compito, genera il modulo fotovoltaico. Il collegamento tra le celle avviene in serie ed è da qui che nasce una prima problematica e sicuramente un punto interrogativo per molti: e se non ci fosse il sole? L'oscuramento anche di una singola cella influenzerebbe tutto il modulo che verrebbe attraversato da una corrente pari a quella che attraversa la singola cella parzialmente o totalmente oscurata.

Il collegamento ulteriore dei moduli in serie e l'aggiunta di altri componenti essenziali, quali l'inverter e i regolatori di carica, formano il pannello fotovoltaico nella sua totalità. E qui si cela una seconda incertezza: una volta che il pannello ha finito il suo ciclo di vita come si smaltisce? Non è semplice riciclare questi materiali e vanno cercate delle soluzioni in merito, altrimenti il fotovoltaico rischia di cadere in una contraddittorietà circa la sua tanto enfatizzata ecosostenibilità.

Quanto all'estetica dell'impianto: immaginare interi metri quadrati di terreni o edifici coperti da questi impianti può generare dubbi circa la loro integrabilità architettonica. Tuttavia l'architettura industriale non prevede, certamente, di perseguire il concetto del 'bello' dell'architettura classica, quanto piuttosto di integrare l'impianto senza alterare o minare la sicurezza.

Non sono, infatti, da sottovalutare la sicurezza sia per l'uomo che per l'edificio (impianto compreso) e la manutenzione che spesso richiede l'impiego di tempo e denaro. Parte di queste due problematiche sono mitigate tramite accordi con eventuali aziende installatrici di moduli fotovoltaici, per quanto riguarda la manutenzione, e seguendo apposite normative, per quanto riguarda la sicurezza.

Il quinto capitolo riporta quelli che possiamo definire come i punti di forza economici del fotovoltaico: la remunerazione e la tariffa incentivante. La prima consiste in tutti quei risparmi dovuti al fatto che non dobbiamo pagare il signor sole; la seconda, talvolta compresa nella remunerazione, si identifica in un 'premio' dovuto all'uso stesso del fotovoltaico. Questa tariffa, moltiplicata per l'energia prodotta, fornisce la sua parte di remunerazione in conto energia e dipende da dimensioni/potenza dell'impianto e integrazione architettonica. Nel caso in cui tutta l'energia prodotta venga autoconsumata (su base annuale) si parla di scambio sul posto; viceversa, se si vuole vendere l'energia prodotta, si può accedere al ritiro dedicato tramite il GSE (Gestore dei Servizi Energetici).

Per capire meglio il tipo di analisi economica finanziaria che un'azienda si trova a dover fare nel momento in cui decide di installare un impianto fotovoltaico, viene riportato un esempio di quelli che devono essere i punti essenziali di un Business Plan di un suddetto impianto di grande taglia (compresa l'analisi di sensibilità sul TIR di progetto).

Infine, per fornire un contesto più moderno e per dare un'utilità maggiore alla relazione, è stato inserito un capitolo dedicato all'attualità dell'argomento: infatti, il fotovoltaico, come anche altre fonti di energia rinnovabili, si sta affermando sempre di più nel mercato ed è sempre più utilizzato con gran successo dalle aziende che si sono prefissate lo scopo dell'autonomia energetica. Per integrare le informazioni a mia disposizione e il mio bagaglio culturale in merito alle fonti di energia rinnovabile, sono andato a seguire un seminario a Faenza (RA) che si prefiggeva lo scopo di informare le aziende sugli scenari e le opportunità d'investire in queste fonti e si concludeva con un incontro tra domanda e offerte di soluzioni innovative da parte di esponenti di varie aziende. È stata per me l'occasione per scoprire che ci sono sia aziende che cercano sia aziende che offrono soluzioni energetiche rinnovabili ma che la criticità è spesso legata alla mancanza di comunicazione, eccezion fatta per questo tipo di seminari.

Ho anche avuto l'occasione di partecipare ad una visita organizzata dall'università all'IKEA e durante la presentazione dell'azienda da parte di alcuni responsabili (marketing, risorse

umane, logistica) ho appreso alcune informazioni riguardo il gigante svedese che, arricchite, successivamente, da una ricerca personale tramite internet e una corrispondenza con uno dei responsabili della sostenibilità per il negozio di IKEA Padova, mi hanno affascinato molto: se un'azienda tanto grande 'viaggia' così velocemente verso un'indipendenza energetica completa a carattere totalmente eco-sostenibile (perfino i materiali) perché siamo ancora fermi alla fase della convinzione (si può fare) e non siamo già a quella della promozione (per farlo ti offro questa soluzione)?

Infine, per sottolineare ulteriormente l'attualità dell'argomento trattato, ricordo che, proprio nel periodo in cui questa tesi veniva elaborata, a Parigi si svolgeva (dal 30 novembre al 12 dicembre del 2015) la diciannovesima Conferenza della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sul cambiamento climatico di Varsavia (COP19).

Il fatto che la situazione oggi sia tanto grave da potersi considerare in alcuni aspetti quasi irreversibile è il motivo principale che mi ha spinto ad affrontare e approfondire nella mia tesi questo argomento, nella speranza di dare un contenuto informativo su un tema così poco divulgato e di dimostrare come l'utilizzo del fotovoltaico come motore energetico sia oggi una soluzione ottima per un'impresa.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ricordare tutti coloro che mi hanno aiutato nella stesura della tesi con suggerimenti, critiche ed osservazioni: a loro va tutta la mia gratitudine.

Ringrazio anzitutto il professor Mirto Mozzon, Relatore, e il dottor Augusto Tassan, Correlatore: senza il loro supporto e la loro guida sapiente questa tesi non esisterebbe.

Un ringraziamento particolare va ai colleghi, amici e familiari che mi hanno incoraggiato.

Il ringraziamento più grande va ad Alessia che mi è stata vicina fisicamente nei miei spostamenti ed emotivamente, sostenendomi in ogni momento con il suo amorevole supporto di critica e d'incoraggiamento.

CAPITOLO 1

Dalla luce l'elettricità

1.Sole

Prima di iniziare a parlare di energia solare è bene riportare qualche informazione essenziale circa la sua fonte: il sole. Dell'enorme quantità di energia che esso irradia nello spazio, quella che tocca la superficie terrestre è soltanto una piccolissima frazione. Tuttavia 745 quadrimilioni di kW/h non si può certo considerare una quantità esigua.

Il sole, con i suoi 1,39 milioni di km di diametro, è la stella attorno alla quale orbitano i pianeti del Sistema Solare. La distanza dalla terra di 150 milioni di chilometri fa sì che venga visto come un disco dalle dimensioni di circa mezzo grado di diametro (pari a quello della luna piena). La superficie, parte luminosa del sole, è uno strato di poche centinaia di chilometri chiamato fotosfera. Al di sopra della fotosfera si estende la cromosfera, uno strato di spessore pari a circa 2000 km con strutture allungate, che si innalzano fino a 10000 km. Adiacente a questo ha inizio la corona, con bassa densità e temperatura dell'ordine di milioni di gradi. Per concludere, al centro avvengono le reazioni di fusione nucleare dell'Idrogeno in Elio che generano quella quantità di energia di cui sopra si è riportata soltanto la parte che interessa il globo terrestre: infatti, qui le temperature si aggirano intorno ai 15 milioni di °C e le densità sono dell'ordine delle centinaia di kg/dm³. Il 90% dell'energia viene generata nella porzione più interna, che ha un diametro del 23% rispetto al totale, e viene poi trasmessa dagli strati più interni a quelli più esterni tramite conduzione, convezione e irraggiamento.

2.Radiazione solare al suolo

Il riscaldamento superficiale della terra deriva dall'energia ceduta ad essa dal sole. Quest'energia si propaga in modo continuo sulla superficie che di volta in volta risulta esposta alla radiazione solare. Tuttavia, per una serie di fattori, la radiazione solare al suolo non risulta essere né distribuita uniformemente né costante nel tempo, con forti conseguenze sul manifestarsi dei fenomeni atmosferici.

Per capire il fenomeno dell'irraggiamento bisogna partire dal sole. La fotosfera, che costituisce lo strato esterno della superficie convettiva, è la sorgente della maggior parte della radiazione solare. L'irraggiamento complessivo solare a livello della fotosfera è pari a

circa 63000 kW/m^2 con una temperatura equivalente di 5779 K . Questo valore di potenza specifica decresce geometricamente con la distanza e, in pratica, dopo aver percorso i 149,5 milioni di km ($\pm 1,7\%$) che separano la terra dal sole, assume un valore molto più ridotto: infatti, all'esterno dell'atmosfera terrestre, alla radiazione solare è associata una potenza complessiva pari a 1367 W/m^2 (denominata costante solare). Poiché la distanza tra il sole e la terra varia periodicamente nel corso dell'anno, la costante solare rappresenta in realtà il valore medio della potenza specifica (oscillante entro un intervallo del $\pm 3\%$) assumendo il valore massimo nel periodo invernale (la terra raggiunge a gennaio il perielio, distanza minima) e quello minimo durante la stagione estiva (la terra raggiunge a luglio l'afelio, distanza massima). A livello del suolo, si registra un'energia specifica minore della costante solare, a causa dei fenomeni di assorbimento e diffusione che hanno luogo nell'atmosfera, i quali vanno a modificare non solo il contenuto energetico della radiazione nel suo complesso ma anche la sua composizione spettrale.

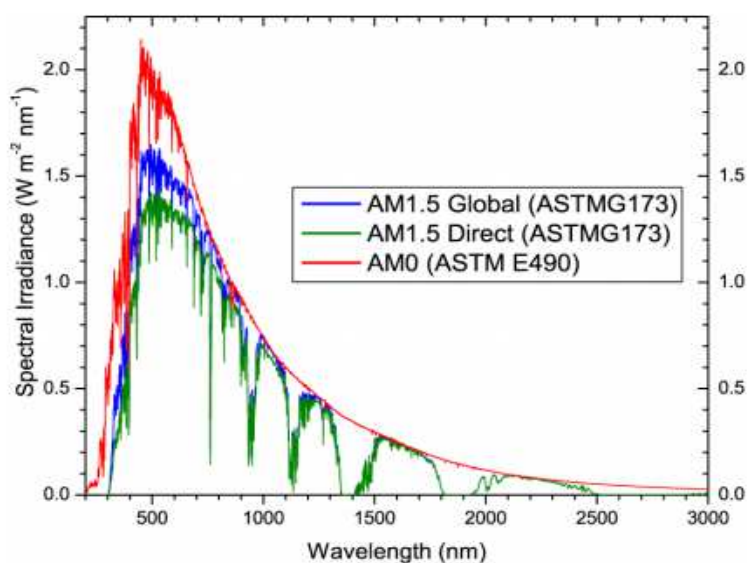


Figura 1.2.1 - Composizione spettrale della luce solare AM0 e AM1.5

Per tenere conto dei fenomeni di assorbimento è stata definita a livello internazionale la massa d'aria unitaria AM1 (Air Mass 1) intesa come spessore di atmosfera standard attraversato dai raggi solari in direzione perpendicolare alla superficie terrestre e misurato al livello del mare. Alle latitudini europee è comunque spesso necessario far riferimento a spettri di radiazioni ancora più attenuati rispetto all'AM1: AM1,5 (figura 1.2.1), AM2 o anche maggiori a seconda dei casi, per tenere conto del percorso di attraversamento della

radiazione nell'atmosfera dovuto alla più o meno pronunciata deviazione dei raggi solari rispetto allo zenit. Viceversa, se ci si trovasse in quota a latitudini tropicali, lo spettro AM1 potrebbe, in alcuni casi, risultare eccessivamente attenuato rispetto alla radiazione realmente incidente. La curva AM0, corrispondente alla radiazione solare misurata al di fuori dell'atmosfera terrestre, risulta invece essere assai simile allo spettro di emissione di un corpo nero portato alla temperatura di 5760 K.

La misura della radiazione solare globale orizzontale, si effettua mediante uno strumento, detto piranometro o, più comunemente, solarimetro. Lo strumento misura l'energia associata alle componenti verticali della radiazione incidente nell'unità di tempo ed è sensibile alle frequenze visibili della radiazione solare e al vicino infrarosso. L'intensità della radiazione globale o potenza specifica è espressa in W/m^2 . Tipicamente i valori di potenza specifica orizzontale possono arrivare in Italia, al livello del mare, durante una giornata estiva di sole, a $900 \div 1100 \text{ W/m}^2$.

Registando a intervalli di tempo regolari l'irraggiamento istantaneo, si possono ottenere diverse grandezze utili per l'ingegneria solare (valore medio orario della radiazione globale, l'integrale giornaliero, il valore massimo giornaliero, ecc.) e tutte le statistiche necessarie per caratterizzare un sito. Inclinando poi lo strumento ad un angolo fisso rispetto al piano orizzontale è possibile misurare la radiazione solare globale su un piano inclinato che risulta uno dei dati fondamentali nella progettazione solare.

3.Celle fotovoltaiche

La conversione della radiazione solare in energia elettrica avviene sfruttando l'effetto indotto da un flusso luminoso che investe un materiale semiconduttore (per esempio silicio) quando quest'ultimo incorpora su un lato atomi di drogante di tipo P (boro) e sull'altro atomi di tipo N (fosforo).

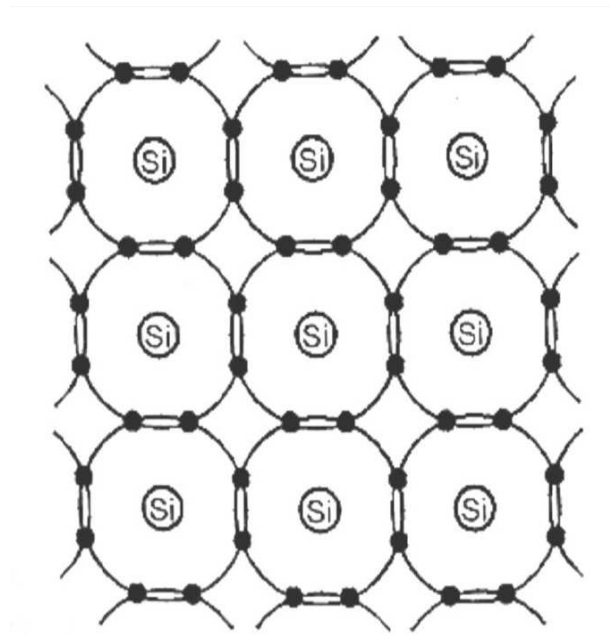


Figura 1.3.1 - Rappresentazione del reticolo cristallino del Silicio

Nel reticolo cristallino del silicio (figura 1.3.1) ciascun atomo è circondato da altri quattro e ognuno di essi mette in comune uno dei suoi quattro elettroni di valenza appartenenti alle orbite più esterne. In questo modo gli è possibile completare l'ottetto esterno e rendere quindi stabile la configurazione (nella realtà, essendo lo spazio tridimensionale, il reticolo assume la forma tetraedrica anziché quella quadrata utilizzata per la rappresentazione su un piano). Gli elettroni appartenenti alle orbite più interne sono invece fortemente legati al nucleo e, pertanto, non entrano in gioco né nei legami con gli altri atomi né nella conduzione elettrica. In un cristallo di questo tipo, detto intrinseco, gli elettroni, vincolati nei legami covalenti con gli altri atomi, si trovano tutti nello stato energetico che appartiene alla banda di valenza e, sempre che non intervengano fattori esterni, non dispongono dell'energia sufficiente per passare alla banda di conduzione.

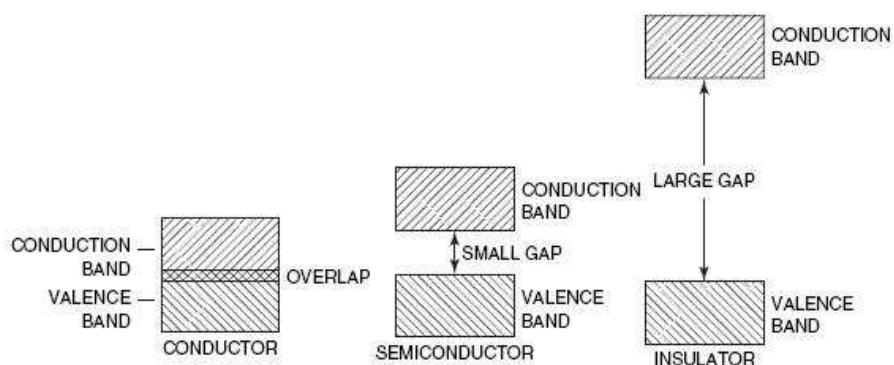


Figura 1.3.2 - Bande di valenza e conduzione

La formazione delle bande di valenza e di conduzione deriva dal fenomeno quantistico enunciato da Pauli che prende il nome di principio di esclusione. Secondo questo principio, in un atomo isolato ciascun elettrone occupa un livello energetico differente da tutti gli altri, corrispondente ad un definito stato quantico. Tuttavia, in un reticolo, l'effetto della vicinanza di un gran numero di atomi uguali fa sì che dalla struttura a livelli si passi alla struttura a bande energetiche, per effetto delle quali ciascun elettrone può essere in grado di occupare un qualsiasi livello energetico all'interno di ciascuna banda. La banda di valenza e quella di conduzione, come si può vedere in figura 1.3.2, sono tra loro separate da un gap energetico di valore E_g che nel silicio vale circa 1,12 eV a temperatura ambiente; quindi, affinché un elettrone possa “saltare” dalla banda inferiore a quella superiore, deve essergli fornita un'energia almeno pari ad E_g (ad esempio sotto forma di energia fotoelettrica o termica).

Quando ciò si verifica, l'elettrone, passato alla banda di conduzione, è libero di muoversi nel reticolo (almeno fino alla sua ricombinazione) esattamente come accade nei metalli, i quali sono conduttori proprio perché gli elettroni più esterni di ciascun atomo appartengono già alla banda di conduzione (le due bande sono parzialmente sovrapposte). Viceversa, i materiali isolanti hanno le due bande molto distanti e pertanto risulta molto difficile che la banda di conduzione venga occupata da un elettrone. I materiali semiconduttori come il silicio sono, come si è visto, caratterizzati dall'avere le bande di valenza e conduzione tra loro separate; tuttavia, ogni elettrone che passa alla banda di conduzione lascia libera una lacuna nella banda di valenza, la quale è anch'essa in grado di muoversi sotto l'effetto di un campo elettrico comportandosi come una carica positiva.

In conclusione, nel reticolo di un cristallo di materiale semiconduttore la conduzione elettrica può avvenire a seguito del movimento degli elettroni nella banda di conduzione e delle

lacune nella banda di valenza. Se all'interno del reticolo cristallino viene inserito un atomo che nell'orbita più esterna possiede tre elettroni (ad esempio un atomo di boro) si ottiene la formazione di una lacuna nella banda di valenza, mentre se tale atomo possiede 5 elettroni esterni (ad esempio un atomo di fosforo) l'effetto risultante sarà di avere un elettrone in più. Nel primo caso l'atomo inserito è detto accettore ed il semiconduttore diventa di tipo P, mentre nel secondo caso si è in presenza di un atomo donatore ed il semiconduttore diventa di tipo N. L'operazione di inserimento di atomi differenti nel reticolo si chiama drogaggio del semiconduttore (da non effettuare oltre una certa misura, al fine di non interferire troppo con la geometria del cristallo) ed è proprio il drogante a determinare l'effettiva conducibilità dei semiconduttori. Il silicio utilizzato nei circuiti a semiconduttori deve avere un elevatissimo grado di purezza, anche se l'industria fotovoltaica tollera normalmente una maggiore percentuale di impurità rispetto a quella elettronica tradizionale.

La conduzione elettrica nei due tipi di cristallo è sostanzialmente differente: mentre nel silicio di tipo P la conduzione avviene per effetto dello spostamento delle lacune nella banda di valenza, nel silicio di tipo N il moto delle cariche è dovuto agli elettroni in eccesso, appartenenti agli atomi donatori, che sono passati nella banda di conduzione. Poiché a temperatura ambientale tutti questi elettroni possono essere considerati già presenti nella banda di conduzione, si può dire che tutti gli atomi donatori concorrono alla conduzione elettrica in modo analogo a quanto avviene nei metalli.

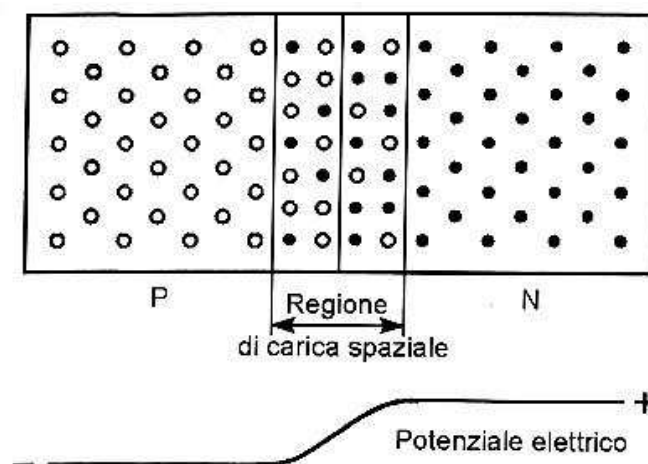


Figura 1.3.3 - Rappresentazione schematica della giunzione P-N

Se vengono posti a contatto i due cristalli di silicio di tipo P e di tipo N, si ottiene una giunzione P-N. Per diffusione, le lacune presenti nel cristallo P tenderanno a spostarsi in

quello di tipo N, mentre gli elettroni liberi presenti nel cristallo di tipo N tenderanno a migrare in quello di tipo P. tuttavia, questo fenomeno continua fintantoché il potenziale elettrico generato dallo spostamento di cariche non diventa tale da controbilanciare il moto di diffusione.

Pertanto, come si può vedere in figura 1.3.3, in condizioni di equilibrio la giunzione P-N è caratterizzata da una regione di confine, detta di carica spaziale o di svuotamento, in cui avviene lo scambio di cariche tra le porzioni di cristallo differentemente drogate e da un potenziale elettrico crescente da P verso N che si stabilizza al di fuori di tale regione.

La giunzione schematizzata in figura 1.3.3 viene utilizzata in elettronica per realizzare il diodo a semiconduttore, ma allo stesso tempo costituisce anche una cella fotovoltaica.

4.Conversione fotovoltaica

Il potenziale elettrico all'interno della giunzione P-N, unitamente alla radiazione luminosa che investe il cristallo, sono alla base della generazione di corrente nella cella fotovoltaica.

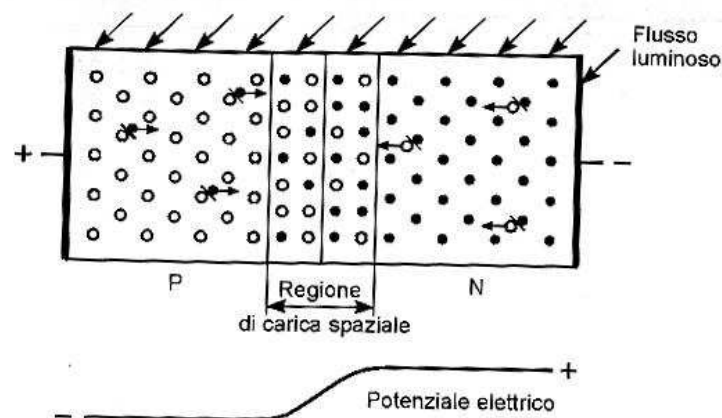


Figura 1.4.1 - Formazione delle coppie elettrone/lacuna in una giunzione P-N per effetto del flusso luminoso

Si consideri la figura 1.4.1, nella quale la giunzione è investita da un flusso luminoso. L'energia associata a tale flusso è in grado di liberare un certo numero di coppie elettrone-lacuna negli atomi di silicio che intercettano i fotoni con energia sufficiente. Tale energia dipende unicamente dalla frequenza di radiazione, sulla base della relazione: $E = h \cdot \nu$ (in cui

v rappresenta la frequenza e h la costante di Plank). La coppia di cariche così generate risentono del potenziale elettrico interno alla giunzione e si muovono di conseguenza; per cui gli elettroni generati nella giunzione P sono attirati verso la giunzione N, mentre le lacune generate nella giunzione N sono attratte verso la giunzione P. La cella fotovoltaica si comporta quindi come un generatore con il polo positivo sulla giunzione P e quello negativo sulla giunzione N.

Pur considerando che tra frequenza f e lunghezza d'onda λ esiste la relazione $f = 1 / \lambda$, nel caso della radiazione luminosa abitualmente ci si riferisce alla lunghezza d'onda. A titolo di esempio, i valori di lunghezza d'onda per la luce visibile risultano essere i seguenti:

Colore	Lunghezza d'onda λ [in nm]
Rosso	0.700 ÷ 0.645
Arancione	0.645 ÷ 0.585
Giallo	0.585 ÷ 0.575
Verde	0.575 ÷ 0.490
Azzurro	0.490 ÷ 0.455
Indaco	0.455 ÷ 0.425
Violetto	0.425 ÷ 0.380

Tabella 1.4.1 - Valori di lunghezza d'onda per la luce visibile

Utilizzando come semiconduttore il silicio, l'energia necessaria a liberare una coppia elettrone-lacuna corrisponde ad una lunghezza d'onda massima per la radiazione luminosa di valore 1.15 μm . La frazione eccedente questo limite (avente lunghezza d'onda maggiore ovvero energia insufficiente) corrisponde a circa il 25% dell'energia complessivamente contenuta nello spettro solare. Il rimanente 75% risulta, pertanto, in grado di liberare coppie elettrone-lacuna.

Tuttavia, al diminuire della lunghezza d'onda, ai fotoni risulta associata un'energia sempre maggiore ma in eccesso rispetto a quella richiesta. La parte eccedente costituisce un surplus che va inevitabilmente perduto, ossia trasformato in calore.

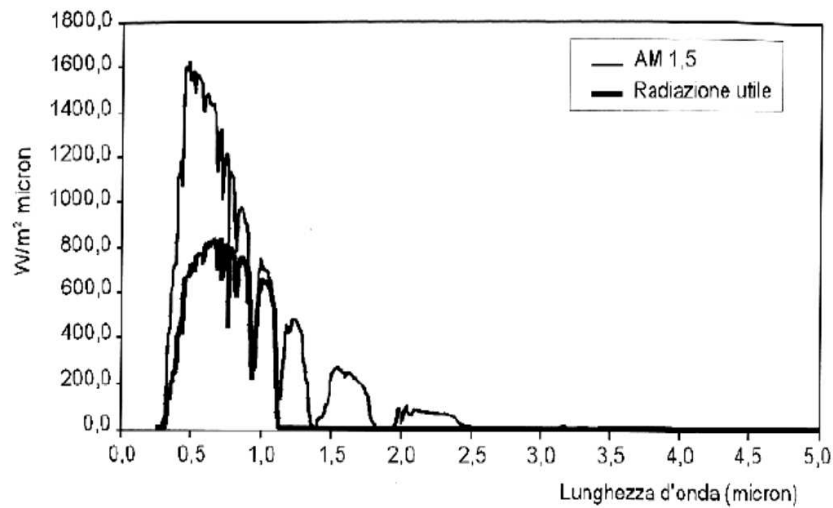


Figura 1.4.2 - Porzione della radiazione solare utilizzata dalle celle in silicio confrontata con la curva AM 1.5

Il diagramma di figura 1.4.2 mostra la quantità di energia fotovoltaica teoricamente ricavabile con una cella al silicio a partire dallo spettro di radiazione AM 1.5.

Il rendimento delle celle fotovoltaiche in silicio è molto distante da quanto si potrebbe dedurre dalla figura 1.4.2, in quanto intervengono ulteriori inefficienze che possono essere così riassunte:

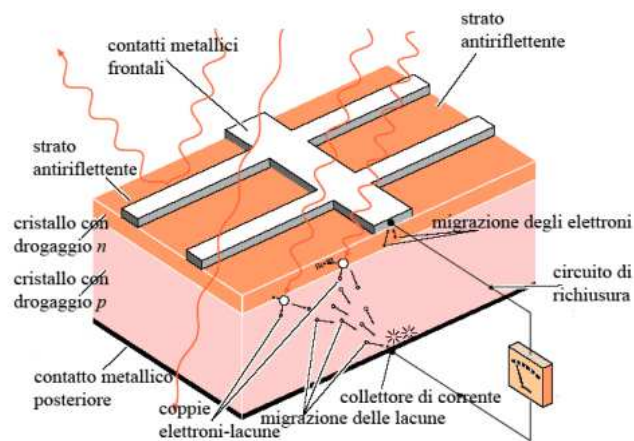


Figura 1.4.3 - Struttura interna di una tradizionale cella fotovoltaica al silicio monocristallino

- Non tutti i fotoni incidenti sulla cella fotovoltaica penetrano all'interno: alcuni vengono riflessi e altri vengono invece intercettati dall'elettrodo frontale.

- Alcune coppie elettrone-lacuna si ricombinano prima che possano essere separate dal campo elettrico interno alla giunzione. Queste perdite dipendono principalmente dal grado di purezza del silicio utilizzato.
- Parte dell'energia potenziale delle coppie elettrone-lacuna che vengono separate risulta inefficace ai fini della conversione in energia elettrica e di conseguenza risulta persa; in definitiva solo una parte della corrente complessivamente prodotta dalla radiazione luminosa risulta utile.

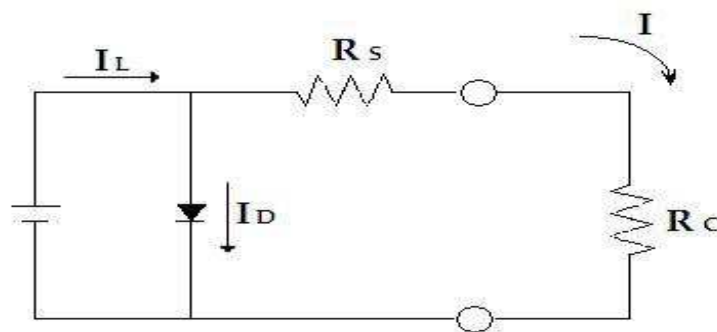


Figura 1.4.3 - Circuito equivalente di una cella fotovoltaica

- Dal circuito equivalente della cella (figura 1.4.3) si nota l'esistenza della resistenza serie R_s dovuta principalmente alla particolare realizzazione dell'elettrodo superiore della cella che deve mediare tra l'esigenza di realizzare un buon contatto ed oscurare il meno possibile la superficie della cella esposta alla luce.
- La resistenza R_c , detta resistenza di shunt, è un parametro chiave nelle prestazioni della cella in condizioni di debole irraggiamento tipiche delle aree europee di esposizione. Il suo valore è molto importante in quanto condiziona pesantemente l'efficienza del modulo in cui la cella viene inserita. Recenti studi hanno dimostrato che resistenze di shunt inferiori a $20 \div 30 \Omega$ sono responsabili di perdite di energia captata del 10% e che un mix di celle a varie resistenze di shunt (tipicamente moduli con celle poco selezionate) sono governate dalla cella a R_c più bassa. Tuttavia questo dato così importante è conosciuto solo dai costruttori di celle e moduli fotovoltaici e non viene evidenziato all'acquirente.

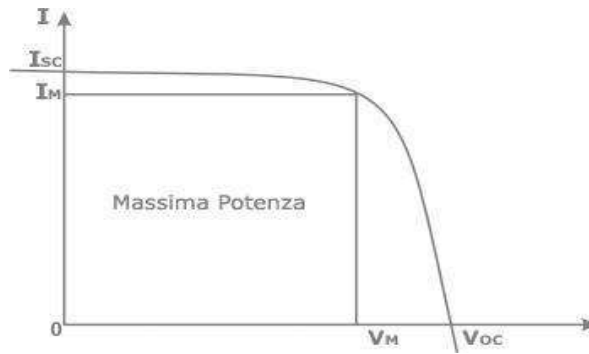


Figura 1.4.4 - Curva tensione corrente di una cella fotovoltaica

La caratteristica elettrica di una cella fotovoltaica di silicio cristallino è riportata in figura 1.4.4. Si osserva che:

a) La condizione di lavoro ottimale della cella è rappresentata dal punto della caratteristica di generazione tensione-corrente in corrispondenza del quale il prodotto $I \cdot V$, che esprime la potenza elettrica ottenibile a parità di altre condizioni, risulta massimo ($I_M \cdot V_M$). Il rapporto tra $I_M \cdot V_M$ e $I_{SC} \cdot V_{SC}$ (prodotto della corrente di cortocircuito e della tensione a vuoto), viene detto fill-factor o fattore di riempimento della cella. Quest'ultimo per le usuali celle al silicio cristallino si aggira intorno a $0.75 \div 0.80$. Il fill-factor è anche un parametro di giudizio sul rendimento della cella: ad elevati valori di questo corrispondono elevate prestazioni.

b) La corrente di cortocircuito I_{SC} risulta di poco superiore alla corrente nel punto di massima potenza I_{pmax} ; a causa del limitato valore di I_{SC} si riscontrano non poche difficoltà nell'utilizzo di un dispositivo elettromeccanico di interruzione automatica della corrente.

Inoltre la figura 1.4.5 evidenzia che la tensione a vuoto V_{OC} è presente con valori prossimi a quello massimo anche per bassissimi valori di radiazione solare; questo implica che l'unico modo per evitare la presenza di tensione ai morsetti di un generatore fotovoltaico consiste nell'oscurare totalmente la superficie captante.

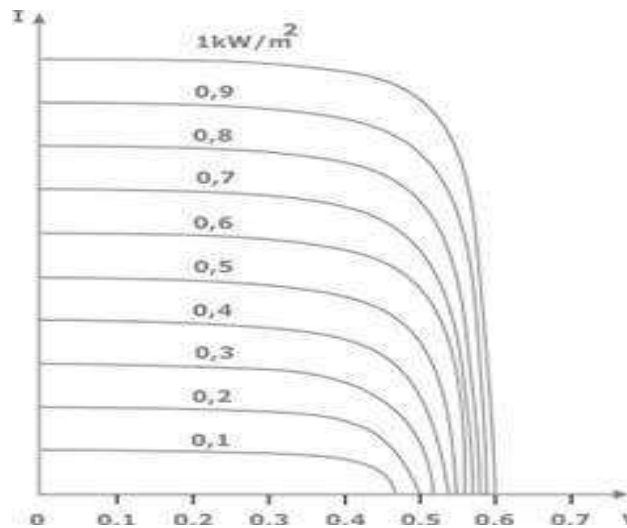


Figura 1.4.5 - Variazione della curva caratteristica in funzione della radiazione incidente

Dalla figura 1.4.5 si capisce infatti come la curva caratteristica di una cella fotovoltaica di silicio policristallino possa variare in funzione della radiazione incidente, a parità di altre condizioni; mentre la corrente erogata varia proporzionalmente alla radiazione, la tensione a vuoto ne risente in misura minore.

CAPITOLO 2

Componenti di un impianto fotovoltaico

1.Moduli fotovoltaici

Le celle di silicio policristallino sono di fatto delle fettine di semiconduttore opportunamente drogato con spessore di qualche centinaio di micron e superficie quadrata di 10 cm di lato. Risulta evidente che l'assemblaggio di più celle una accanto all'altra, fino a formare il modulo fotovoltaico con i relativi collegamenti elettrici, non può che avvenire posando le celle su un supporto rigido (il vetro anteriore) per compensare la fragilità dei sottili cristalli impiegati: infatti, questi non sono in grado di assorbire sforzi meccanici o deformazioni senza danni.

Le celle fotovoltaiche a film sottile (amorfo, CIS, CdTE) sono, invece, formate per deposizione di una miscela di gas: possono così essere utilizzati differenti tipi di supporti (detti substrati), per formare sia moduli rigidi che moduli flessibili, arrivando a realizzare prodotti leggeri e deformabili, utili specialmente per l'alimentazione di carichi mobili.

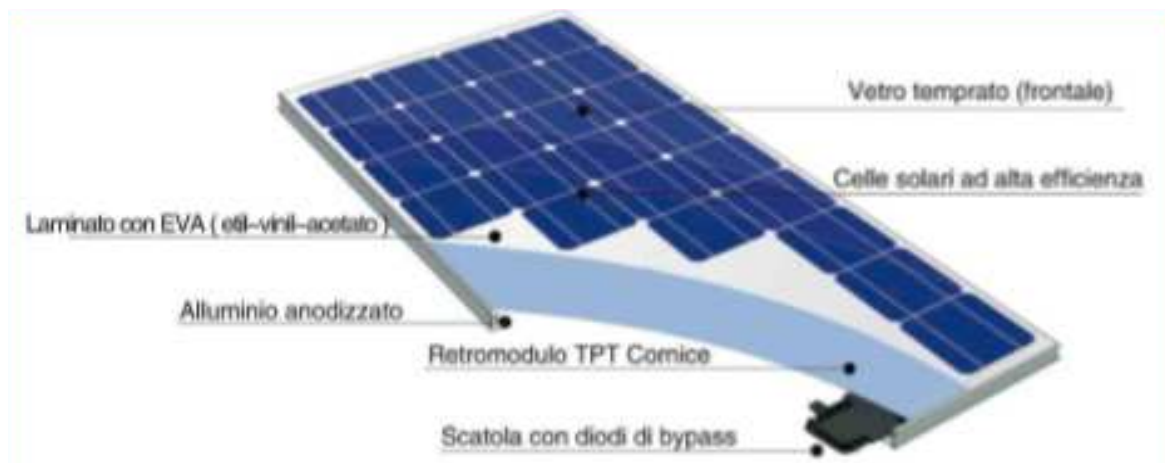


Figura 2.1.1 - Sezione tipica di un modulo fotovoltaico

La figura 2.1.1 illustra lo spaccato di un modulo fotovoltaico in silicio policristallino: si può notare che anteriormente vi è un vetro temprato di circa 4 mm di spessore che permette il passaggio della luce proteggendo al tempo stesso la parte attiva. Le caratteristiche meccaniche del vetro superiore devono essere tali da assicurarne la calpestabilità, ovvero reggere il peso di una persona senza deformazioni apprezzabili. Devono inoltre essere in grado di resistere a condizioni meteorologiche particolarmente severe (per esempio, gli urti in seguito alla caduta di grandine di grosse dimensioni).

Tra il vetro e le celle fotovoltaiche viene interposto un sottile strato trasparente di vinilacetato di etilene (EVA) che contiene additivi che ne ritardano l'ingiallimento dovuto all'esposizione ai raggi ultravioletti durante la vita operativa del modulo. Lo scopo dell'EVA è triplice:

1. evitare un contatto diretto tra celle e vetro;
2. eliminare gli interstizi che altrimenti si formerebbero a causa della superficie non perfettamente liscia delle celle;
3. isolare elettricamente la parte attiva dal resto del laminato.



Figura 2.1.2 - Modulo fotovoltaico da 72 celle in silicio policristallino

Le celle fotovoltaiche, che si presentano all'assemblaggio del modulo con i contatti elettrici anteriori e posteriori già predisposti, vengono appoggiate sul vetro a matrice (ad esempio, in

moduli da 36 celle si possono avere 4 file da 9 celle ognuna, come mostra la figura 2.1.2) e collegate elettricamente tra loro (generalmente in serie) utilizzando sottili nastri metallici elettrosaldati.

Il numero di celle presenti in ogni singolo modulo fotovoltaico assume generalmente valori standard: 36, 64 e 72 cui corrispondono dimensioni circa di 1 x 0.5 m, 0.8 x 0.8 m, 1 x 1m (figura 2.1.2).

Sul retro delle celle viene posto un ulteriore foglio di EVA, con funzioni analoghe a quelle del foglio anteriore. A chiusura del sandwich realizzato, viene in genere utilizzato un foglio di polivinile fluorurato Tedlar, eventualmente rinforzato con fogli metallici e polimerici per aumentare la sua impermeabilità all'ossigeno e all'acqua. In alternativa è possibile usare un altro vetro con caratteristiche meccaniche e trasmissive della luce inferiori a quelle previste per il vetro anteriore: un modulo realizzato in questo modo viene detto a doppio vetro.

2.Collegamenti elettrici

Come visto nel paragrafo precedente, i moduli fotovoltaici in silicio cristallino contengono un certo numero di celle (normalmente 36, 64 o 72) elettricamente collegate tra loro così da formare un unico componente. Nei moduli commerciali le celle fotovoltaiche sono collegate in serie. Come risultato, i moduli fotovoltaici si configurano esternamente come componenti a due terminali (o quattro se sono previste due sezioni), aventi una curva caratteristica di generazione tensione-corrente con andamento identico a quello delle celle che lo compongono ma con valori di tensione proporzionali al numero di celle in serie.

Il collegamento in serie delle celle fotovoltaiche che compongono un modulo avviene facendo uso di sottili bandelle metalliche elettrosaldate alle facce superiori e inferiori delle celle stesse: essendo le celle fotovoltaiche assimilabili a dei diodi semiconduttori, il loro collegamento in serie si traduce in un circuito come quello di figura 2.2.1.

Considerando il funzionamento elettrico della serie di celle, si nota che, qualora la cella venisse oscurata, quest'ultima cesserebbe di comportarsi da generatore funzionando invece come un diodo polarizzato inversamente: questo comporterebbe il blocco della corrente generata azzerando così l'energia prodotta da tutta la catena, ossia dal modulo. Nel caso in cui solo una delle celle risultasse parzialmente oscurata, la corrente che attraversa il modulo risulta pari a quella che tale cella produrrebbe se presa singolarmente. È importante quindi fare in modo che, durante il loro funzionamento, i moduli fotovoltaici vengano ombreggiati il

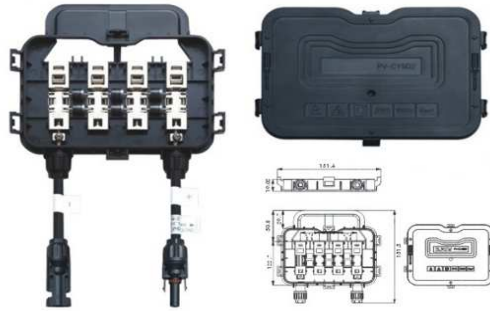


Figura 2.3.1 – Esempio di scatola di terminazione (Junction box)

4. Da modulo a campo

Lo schema di figura 2.4.1 illustra come più moduli vengano collegati in serie per formare quella che viene chiamata stringa, al fine di raggiungere la tensione nominale; più stringhe vengono poi collegate tra loro in parallelo fino a raggiungere la potenza che si desidera installare; nello schema sono anche rappresentati i diodi di by-pass. In serie ad ogni stringa si può poi notare la presenza di un diodo di blocco, il cui scopo è impedire che, qualora l'erogazione di potenza delle singole stringhe non sia bilanciata, gli squilibri di tensione tra le stesse possano provocare dei ricircoli di corrente verso quelle a tensione minore. Inoltre, essi evitano eventuali ritorni di corrente alle apparecchiature generatrici poste a valle delle stringhe (ad es. batteria).

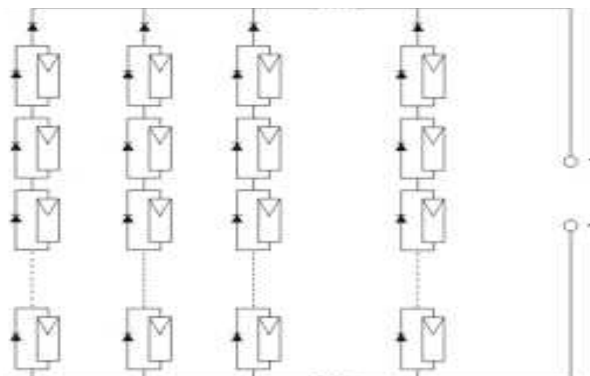


Figura 2.4.1 – Schema di collegamento di stringhe fotovoltaiche in parallelo

5. Sistema di accumulo (la batteria)

In quasi tutti gli impianti fotovoltaici è previsto un sistema di accumulo (batteria) la cui funzione è immagazzinare energia (fornita dal pannello fotovoltaico) durante il giorno per poi restituirla nella notte o nei periodi di scarsa insolazione.

Le batterie disponibili in commercio lavorano ad una tensione di 12 V o suoi multipli. Il tipo di batteria più idonea ad essere impiegata negli impianti fotovoltaici dovrebbe avere le caratteristiche riportate nella tabella 2.5.1:

Elevata efficienza	- rapporto tra energia fornita ed energia immagazzinata
Lunga durata	- numero di cicli carica-scarica
Buona resistenza agli sbalzi di temperatura	- impianti in quota
Bassa manutenzione	- utenze isolate-remote
Ridotta auto scarica	- impianti che rimangono inattivi per mesi

Tabella 2.5.1 – Caratteristiche di una batteria piombo-acido

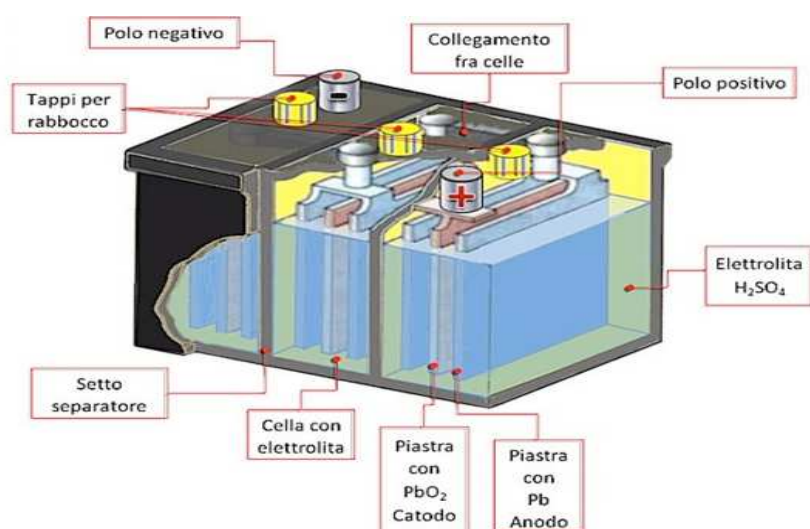


Figura 2.5.1 – Batteria piombo-acido

Le batterie che, in qualche misura, corrispondono alle esigenze sopra descritte sono del tipo piombo-

acido (figura 2.5.1), sviluppate per le esigenze automobilistiche e ormai collaudate da decenni.

Esistono anche batterie con elettrolita non liquido ma in forma di gel. Questo consente una ridottissima manutenzione e un trasporto più agevole, per contro sono disponibili in commercio con capacità ridotte e richiedono regolatori di carica dedicati; inoltre questi tipi di batterie hanno un costo decisamente più elevato rispetto a quelle tradizionali.

Ogni elemento che compone una batteria ha una tensione nominale di 2 V. Durante la fase di carica occorre fare in modo che la loro tensione non superi determinati valori, altrimenti gli elementi svilupperebbero gas con conseguente surriscaldamento con i valori di temperatura riportati nella tabella 2.5.2. Durante la scarica è bene che la tensione di ogni elemento non scenda al di sotto di 1.85 V.

Temperatura elettrolito [°C]	Tensione sviluppo gas [V / elemento]
15	2,445
25	2,400
35	2,335

Tabella 2.5.2 – Variazione della tensione di sviluppo gas in funzione della temperatura

La capacità nominale di una batteria è riferita ad una scarica completa in 10 ore (con tensione finale di 1,85 V per elemento). Come dimostrano i dati riportati nella tabella 2.5.3, se la carica avviene in tempi più brevi la capacità effettiva si riduce, viceversa aumenta se la carica avviene in tempi più lunghi.

Ore scarica	5	10	24	48	72	120	240
Capacità A / h	90	100	120	136	144	150	156
Variazione capacità	-10%	-----	+20%	+36%	+44%	+50%	+56%

Tabella 2.5.3 – Variazione capacità di una batteria da 100 A / h in funzione del tempo di scarica
(tensione finale / elemento = 1,85 V)

6.Regolatori di carica

Una batteria con tensione nominale di 12 V è composta da sei elementi e, durante la fase di carica, occorre fare in modo che la sua tensione non superi i 14,1 V circa, altrimenti si svilupperebbero i dannosi gas di cui già accennato.

I moduli fotovoltaici composti da 36 celle sviluppano una tensione di circa 18 V che cala fino a batteria completamente scarica, per poi risalire durante la carica. Ma, quando quest'ultima ha raggiunto la sua carica completa, la tensione applicata supera i 14,1 V e, perciò, potrebbe danneggiare la batteria stessa. Per evitare questa spiacevole situazione occorre inserire tra pannello e batteria un regolatore di carica.

I regolatori più diffusi sono quelli di tipo on-off che consistono nella completa connessione o sconnessione del pannello fotovoltaico dalla batteria quando la tensione della stessa supera una determinata soglia (generalmente 14,1 V). I regolatori di tipo on-off si possono suddividere in due tipologie:

1. regolatori verso il pannello: il pannello fotovoltaico viene scollegato o cortocircuitato quando la tensione di batteria raggiunge i 14,1 V; viene invece ricollegato o eliminato il cortocircuito quando la batteria scende a 12,5 V;
2. regolatori verso il pannello e verso il carico: oltre ad espletare le funzioni precedentemente descritte, controlla anche la corrente verso il carico, scollegandolo se viene superato un determinato amperaggio o se la tensione di batteria scende al di sotto di un certo valore (generalmente 10,8 V).

Un normale modulo fotovoltaico a 35 o 36 celle può essere usato per caricare piccole batterie o mantenere la carica di batterie più grandi (ad es. in auto o in camper, a condizione che la corrente generata non sia troppo elevata (massimo 1 A).

7.Inverter

Un'ultima considerazione va fatta sulla natura del carico. Se quest'ultimo è previsto per essere alimentato in corrente alternata, occorrerà far uso di un convertitore statico di potenza che si identifica col termine inverter.

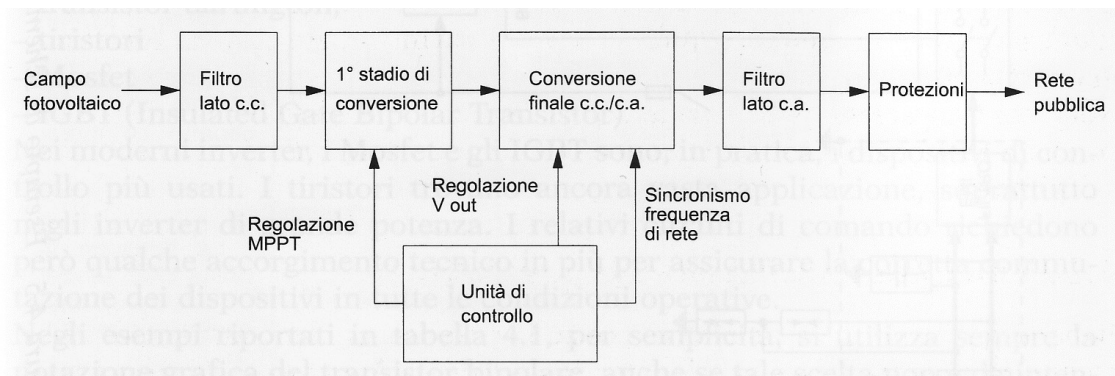


Figura 2.7.1 - Schema a blocchi di un inverter per applicazioni grid-connected

Il principio di funzionamento dei moderni inverter (figura 2.7.1) si basa su di un elevatore di tensione a commutazione e di un ponte di conversione (figura 2.7.2). La tensione di batteria, tramite l'alimentatore a commutazione, viene elevata a circa 300 V e, tramite il ponte di conversione, trasformata in alternata. Quest'ultimo fa uso di semiconduttori pilotati alternativamente che fungono da interruttori. La tensione di uscita viene poi filtrata.

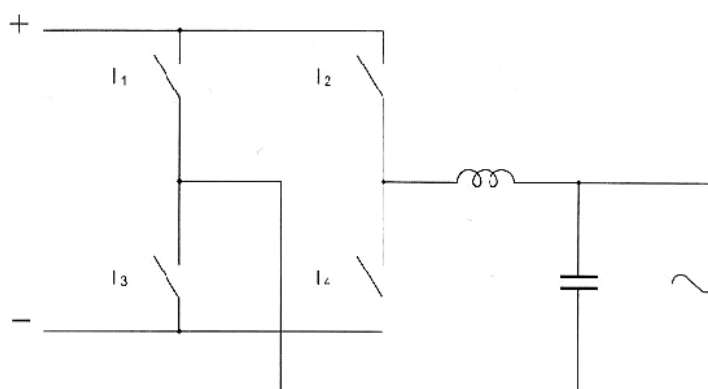


Figura 2.7.2 - Schema di principio di un ponte di conversione

$I_{1,2,3,4}$ sono i transistor di commutazione. Facendo condurre e interdire alternativamente le coppie $I_1 - I_3$ e $I_2 - I_4$ si ottiene la conversione da corrente continua a corrente alternata. Quando I_1 e I_3 conducono, I_2 e I_4 sono interdetti e viceversa.

Si fa uso di un elevatore di tensione a commutazione per poter operare con frequenze relativamente alte (30 ÷ 200 kHz), in modo da ridurre notevolmente l'ingombro del

trasformatore: infatti, questi inverter hanno dimensioni molto ridotte rispetto a quelli delle generazioni precedenti poiché presentano in uscita una tensione con forma d'onda definita sinusoidale modificata.

Si sposta ora l'attenzione su un particolare tipo di inverter: quello fotovoltaico per immissione in rete (figura 2.7.3). Si tratta di un inverter progettato espressamente per convertire l'energia elettrica sotto forma di corrente continua prodotta da modulo fotovoltaico, in corrente alternata da immettere direttamente nella rete elettrica. Queste macchine estendono la funzione base di un inverter generico con funzioni estremamente sofisticate e all'avanguardia, mediante l'impiego di particolari sistemi di controllo software e hardware che consentono di estrarre dai pannelli solari la massima potenza disponibile in qualsiasi condizione meteorologica.



Figura 2.7.3 - Un inverter per immissione in rete: a sinistra gli ingressi di 2 stringhe, al centro l'uscita AC monofase

Questa funzione prende il nome di MPPT, un acronimo di origine Inglese che sta per Maximum Power Point Tracker: infatti, i moduli fotovoltaici hanno una curva caratteristica V-I tale che esiste un punto di lavoro ottimale, detto appunto Maximum Power Point, dov'è possibile estrarre la massima potenza disponibile.

Questo punto della caratteristica varia continuamente in funzione del livello di radiazione solare che colpisce la superficie delle celle. È evidente che un inverter in grado di restare "agganciato" a questo punto, otterrà sempre la massima potenza disponibile in qualsiasi condizione. Ci sono svariate tecniche di realizzazione della funzione MPPT, che si differenziano per prestazioni dinamiche (tempo di assestamento) e accuratezza. Se la precisione dell'MPPT è estremamente importante, il tempo di assestamento lo è, in taluni casi, ancor di più: infatti, mentre tutti i produttori di inverter riescono ad ottenere grande precisione sull'MPPT (tipicamente tra il 99-99,6% della massima disponibile), solo in pochi

riescono ad unire precisione a velocità. È proprio nelle giornate con nuvolosità più variabile che si verificano sbalzi di potenza solare ampi e repentini con variazioni da 100 W / m^2 a $1\,000 - 1\,200 \text{ W / m}^2$ in meno di 2 secondi. In queste condizioni, che sono molto frequenti, un inverter con tempi di assestamento minori di 5 secondi riesce a produrre fino al 5%-10% di energia in più di uno lento.

Alcuni inverter fotovoltaici sono dotati di stadi di potenza modulari e alcuni sono addirittura dotati di un MPPT per ogni stadio di potenza. In questo modo i produttori lasciano all'ingegneria di sistema la libertà di configurare un funzionamento master/slave o a MPPT indipendenti. L'utilizzo di MPPT indipendenti fornisce un vantaggio oggettivo in condizioni di irraggiamento non uniforme dei pannelli: infatti, accade spesso che la superficie dei pannelli solari sia esposta al sole in modo difforme su tutto il campo. Ciò avviene o perché il campo è disposto su due diverse falde del tetto o perché i moduli non sono distribuiti su stringhe di uguale lunghezza oppure ancora a causa di ombreggiamenti parziali dei moduli stessi. In questo caso l'utilizzo di un solo MPPT porterebbe l'inverter a lavorare fuori dal punto di massima potenza e, conseguentemente, la produzione di energia ne sarebbe danneggiata.

Un'altra caratteristica importante di un inverter fotovoltaico, è l'interfaccia di rete. Questa funzione, generalmente integrata nella macchina, deve rispondere ai requisiti imposti dalle normative dei diversi enti di erogazione di energia elettrica.

In Italia, il CEI ha rilasciato la Norma CEI 0-21, attualmente giunta all'edizione 2. Questa normativa prevede una serie di misure di sicurezza tali da evitare l'immissione di energia nella rete elettrica qualora i parametri di questa siano fuori dai limiti di accettabilità.

8. Smaltimento e riciclaggio fotovoltaico

In generale, tutte le tecnologie utilizzate nei processi produttivi dei moduli fotovoltaici implicano alcune ricadute ambientali che solo adeguati provvedimenti tecnici riescono a mitigare. Nell'industria fotovoltaica viene utilizzata una grande varietà di materiali che risultano potenzialmente tossici e pericolosi. La sostenibilità ambientale rispetto all'utilizzo del fotovoltaico deve essere valutata non solo per le indubbie peculiarità non inquinanti (emissioni nocive ed acustiche nulle) ma anche sulla eco-compatibilità dello smaltimento a fine vita utile.

La tabella 2.8.1 va a riassumere quelle che sono le potenziali ricadute ambientali nell'utilizzo dell'energia solare fotovoltaica e le soluzioni migliorative relative a ciascuna di esse:

Potenziali ricadute ambientali	Soluzioni migliorative
Rilascio di elementi e sostanze tossiche o pericolose per la salute personale durante il processo di fabbricazione delle celle o durante la vita del sistema	- Adozione di tutte le precauzioni previste dalla legislazione vigente in materia di salute personale; - Ricerca di nuove soluzioni tecnologiche costruttive che mitighino i rischi potenziali;
Occupazione del terreno e disturbo all'ecosistema nelle aree di terreno occupate dagli impianti	- “Scelta ecologica” delle aree di posa con possibilità di ricostruzione dell'ecosistema locale; - Uso polifunzionale del fotovoltaico: occupazione di superfici marginali (tetti, facciate, arredo urbano ecc.);
Impatto visivo con disturbo dell'armonia naturale	- Rafforzamento del concetto di generazione distribuita (produzione decentralizzata di energia elettrica); - Integrazione architettonica del fotovoltaico in edifici, arredo urbano ecc.;

Tabella 2.8.1 - Principali ricadute ambientali del fotovoltaico e soluzioni migliorative

CAPITOLO 3

Principi di progettazione e realizzazione

1. Classificazione

Se si volesse fornire una classificazione del tutto generica dei sistemi fotovoltaici, si otterrebbe il seguente schema in cascata (figura 3.1.1):

Figura 3.1.1 – Classificazione sistemi fotovoltaici – 1° e 2° livello

Trascurando il primo livello di classificazione, si nota che nel secondo sono presenti due macrofamiglie di impianti:

- Stand-alone: impianti isolati, che alimentano utenze remote, difficilmente raggiungibili con opere civili di elettrificazione; il profilo dell'utenza è soddisfatto da un'alimentazione diretta nelle ore di sole nell'arco di una giornata tersa, mentre nelle ore notturne e nelle giornate con ridotta insolazione il carico è alimentato con un sistema di accumulo protetto dai sovraccarichi.
- Grid-connected: impianti connessi alla rete di distribuzione elettrica; in questo caso il parco batterie è sostituito da un sistema di accumulo "ideale" costituito dalla rete elettrica dalla quale, se necessario, attingere energia nelle ore notturne e nelle giornate con livelli d'insolazione non sufficienti a soddisfare il fabbisogno energetico dell'utenza. Nelle ore di sole in giornate terse, l'utenza è alimentata direttamente dal generatore fotovoltaico ed eventuali eccedenze vengono immesse in rete. Questi impianti godono del sistema incentivante in conto energia.

A loro volta i sistemi connessi in rete possono far uso di sistemi fissi o ad inseguimento solare.

I primi possono essere distinti in:

- N.I.A.: impianti Non Integrati Architettonicamente;
- P.I.A.: impianti Parzialmente Integrati Architettonicamente;
- I.A.: impianti Integrati Architettonicamente.

Per quanto riguarda i secondi, il generatore fotovoltaico è disposto di un "tracker" che ha la funzione di orientarlo verso il disco solare, cercando di minimizzare l'angolo di incidenza con cui la radiazione solare impatta sul piano dei moduli e aumentando così la producibilità nelle giornate terse. Questi impianti sono classificabili architettonicamente come impianti N.I.A.

2.Architettura industriale

Spesso le coperture dei capannoni industriali offrono soluzioni in termini di spazio che possono essere facilmente utilizzate per ospitare i generatori fotovoltaici; trattandosi in genere di ampie superfici, non sono tali da costituire un limite alla potenza di progetto.

Il caso più comune è costituito dagli shed, ossia da lucernari con la superficie vetrata verticale rivolta a Nord, per evitare che la luce solare diretta possa generare effetti di abbagliamento all'interno. Verso Sud, invece, gli shed offrono una superficie inclinata che può essere sfruttata per alloggiare dei moduli fotovoltaici (figura 3.2.1).

Le alternative più utilizzate sono terrazzi piani e coperture metalliche in lamiera; in questi casi, il vantaggio rispetto all'architettura residenziale potrebbe consistere in una minor cura verso i parametri estetici, la quale si tradurrebbe anche in un minor costo totale.

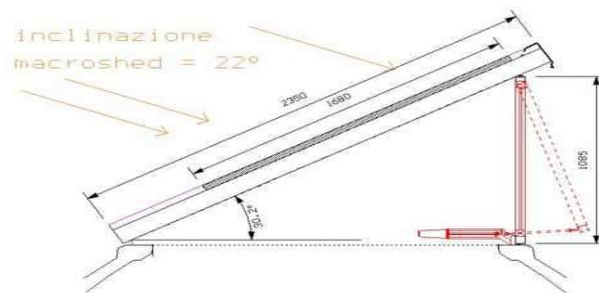


Figura 3.2.1 – Disposizione dell'impianto solare su shed

Vediamo di seguito quali sono le installazioni tipo di impianti fotovoltaici per le aziende (industriali, commerciali ed agricole).

Nel caso di capannoni industriali e aziende agricole i moduli o pannelli solari fotovoltaici possono essere installati sfruttando opportunamente gli spazi disponibili (tetto piano, inclinato, terreno). In caso di copertura piana o inclinata è importante in fase preliminare controllare il buon stato della copertura con particolare attenzione alla struttura portante e alle condizioni dello strato impermeabilizzante. Di seguito vediamo alcune delle installazioni più comuni:

- Fotovoltaico su tetto inclinato: è possibile installare i pannelli fotovoltaici su coperture inclinate e tetti a falda, utilizzando in modo ottimale la superficie disponibile per produrre energia elettrica dal sole (figura 3.2.2). L'inclinazione ottimale del piano su

cui posizionare i moduli fotovoltaici è 30° in tutta Italia. Nella foto riportata di seguito vediamo l'esempio di un'azienda agricola, in cui la falda a sud è stata quasi interamente ricoperta da un impianto fotovoltaico



Figura 3.2.2 - Impianto realizzato su tetto inclinato

- Fotovoltaico su terreno: spesso per le aziende (prime fra tutte quelle agricole) vi è una disponibilità di terreni inutilizzati che possono essere sfruttati per produrre energia elettrica dal sole. In questo caso, trattandosi di superfici piane, si possono posizionare i moduli fotovoltaici su una struttura apposita con inclinazione ottimale a 30° e con orientamento a sud (figura 3.2.3). L'unica avvertenza da seguire in caso di installazione su terreno riguarda l'eventuale presenza di fonti di ombreggiamento attuali o future (casette per gli attrezzi, alberi, pali della luce) che possono ridurre la produttività del sistema a causa del cosiddetto "effetto palo". Anche un'ombra parziale al sistema fotovoltaico può comprometterne infatti il corretto funzionamento.



Figura 3.2.3 - Impianto realizzato su terreno

- Fotovoltaico su tetto piano: i pannelli solari fotovoltaici possono essere posizionati su coperture o tetti piani (figura 3.2.4). Per copertura piana si intende un tetto con inclinazione massima dell'1% (circa 0,5°) rispetto al piano orizzontale. Si tratta normalmente di coperture realizzate in calcestruzzo armato ricoperte con guaine impermeabilizzanti (non lamiere grecate o ondulate). Anche nel caso del tetto piano, i pannelli solari fotovoltaici possono essere posati in modo ottimale (inclinazione a 30° e orientamento perfettamente a sud). In caso di installazione su tetto piano è però importante fare attenzione a quelle balaustre o a quei parapetti che potrebbero proiettare delle ombre sui moduli e distanziare opportunamente le file per evitare che si ombreggino tra di loro.



Figura 3.2.4 - Impianto realizzato su tetto piano

3. Layout dell'impianto elettrico

La disposizione dei componenti del sistema nel sito di installazione è un aspetto della progettazione che deve essere valutato caso per caso e per il quale non esistono regole generali. Tuttavia, l'alloggiamento dell'accumulo e delle apparecchiature elettriche in un locale disponibile è sempre la soluzione tecnica da privilegiare rispetto ad un riparo esterno.

Vi sono poi alcuni aspetti che sarebbe utile verificare dopo aver fatto le scelte di layout progettuali:

- accertarsi che le condizioni ambientali controllabili non abbiano un'influenza negativa sulle prestazioni o la durata dei componenti del sistema;

- accertarsi che le condizioni di sicurezza elettrica e di operatività durante le manutenzioni siano scrupolosamente seguite;
- considerare se il layout scelto consentirà al sistema di essere armonizzato con l'ambiente in cui si inserisce con un minimo d'impatto visivo.

Quando poi l'area a disposizione per posizionare il generatore fotovoltaico (che risulta il componente più ingombrante) non consente al progettista la disposizione di tutta la potenza su di un unico piano orientato, restano due alternative possibili:

- aumentare la dimensione in altezza del piano lasciando inalterata quella massima disponibile orizzontale;
- considerare di disporre il generatore fotovoltaico su più file.

Adottando la prima soluzione, si aumenta la superficie esposta al vento e l'aumento di altezza rende in genere più visibile il generatore fotovoltaico. In generale non vanno superati i 3-4 metri rispetto al piano degli appoggi della struttura.

Con la seconda soluzione si introducono invece ombreggiamenti reciproci che penalizzano la produzione elettrica ma, d'altra parte, si ottiene un effetto di schermatura dell'azione del vento (sia frontale che posteriore) per le file interne. Qualora si stia progettando un impianto di grande taglia questa disposizione consente di ottenere una riduzione dei costi nella realizzazione dell'opera.

Ricordiamo, tuttavia, che in base a considerazioni già approfondite riguardo gli effetti dell'oscuramento parziale di un modulo fotovoltaico, si deduce che l'ombreggiamento, anche parziale, di una fila di moduli può portare a sensibili perdite di potenza dell'impianto, spesso maggiori di quelle calcolabili attraverso il semplice rapporto tra l'area ombreggiata e la superficie totale.

Il criterio pratico da adottare quando viene scelta l'architettura del sistema dipende dal tipo di impianto:

- Se si sta adottando un impianto stand-alone che deve essere in grado di garantire un servizio elettrico in tutti i periodi dell'anno, si dovrà ridurre il più possibile gli ombreggiamenti, al fine di non penalizzare eccessivamente la già ridotta produzione nei mesi invernali.
- Se, viceversa, l'impianto fotovoltaico non rappresenta l'unica fonte di energia disponibile, come nel caso dei tetti fotovoltaici e degli impianti ibridi (questi ultimi dotati di gruppo elettrogeno di emergenza), è possibile orientarsi verso soluzioni più compatte pur scendendo a qualche compromesso in termini energetici.

- Se infine si tratta di grandi impianti di produzione, la valutazione dovrebbe essere molto accurata con l'ausilio di simulazioni al calcolatore dell'energia captata/persa.

È consigliabile tendere comunque al raggiungimento di un onesto compromesso tra prestazioni dell'impianto e superficie di terreno occupata: per le latitudini italiane, in prima approssimazione, si può assumere un'inclinazione tra i raggi solari e il piano orizzontale di 20° senza che si creino ombreggiamenti reciproci fra i moduli.

CAPITOLO 4

Sicurezza, manutenzione e normative

1.Sicurezza

Gli impianti fotovoltaici, al pari di qualsiasi altro impianto elettrico, devono essere progettati e realizzati secondo criteri in grado di garantire la sicurezza e l'incolumità delle persone, siano esse a conoscenza delle finalità dell'impianto (o della sua esistenza) o meno. È ragionevole supporre che la percezione di possibili condizioni di pericolo sia tanto minore quanto più il generatore fotovoltaico risulti integrato nella struttura che lo ospita.

Oltre alla salvaguardia delle persone, i criteri di sicurezza adottati devono anche garantire che l'impianto fotovoltaico non possa arrecare danno a quanto lo circonda (per esempio, attraverso l'innescò di incendi). In questo senso occorre vagliare anche gli effetti di possibili sovratensioni dovute a scariche atmosferiche. Questi eventi, difficilmente prevedibili se non a livello statistico, introducono negli impianti condizioni di stress particolarmente severe che, se non adeguatamente controllate, sono fonte di pericolo per persone e cose.

Occorre quindi, acquisite le informazioni sul sito nel corso del sopralluogo ed effettuato il dimensionamento dei componenti principali in termini di taglia del campo fotovoltaico, potenza del convertitore statico e capacità di accumulo (se presente), individuare l'architettura del sistema. In questa fase ci si propone di fornire i principali criteri di sicurezza elettrica da adottare ed eventuali risponderne a requisiti particolari per componenti e sistema. Può essere utile riferirsi allo schema a blocchi tipico per l'applicazione in progetto, adattandolo, quando occorre, alle specifiche esigenze.

Mentre il rischio per le persone è rappresentato dallo shock elettrico (contatti diretti e indiretti), per le cose esso si manifesta tramite malfunzionamenti e possibilità di innesco incendi.

A questo punto, risulta opportuno richiamare alcune nozioni fondamentali riguardo ai sistemi elettrici: per sistema elettrico si intende la “parte di un impianto elettrico costituito dal complesso dei componenti elettrici aventi una determinata tensione nominale” (norma CEI 64-8/2). Gli impianti fotovoltaici, se di tipo stand-alone, costituiscono generalmente un sistema elettrico isolato funzionante in cc o in ca. Qualora invece l'impianto fotovoltaico risulti inserito in un sistema elettrico di bassa tensione già esistente, esso si troverà ad ereditarne, almeno per quanto riguarda la parte in alternata, alcune caratteristiche: tensione, sistema di conduttori attivi e tipo di collegamento a terra.

Riguardo al valore della tensione, vale quanto previsto per la classificazione della tensione nominale prevista dalle norme. In pratica, gli impianti fotovoltaici appartengono ai sistemi di categoria 0 (fino a 50 V ca e 120 V cc) o a quelli di categoria I (fino a 1000 V ca e 1500 V cc).

2. Le scariche atmosferiche

Gli impianti fotovoltaici, essendo in tutto o in gran parte dislocati all'esterno di costruzioni o su terreno, risultano essere particolarmente sensibili alle scariche atmosferiche sia di tipo diretto (struttura colpita da un fulmine) sia di tipo indiretto (caduta di un fulmine in prossimità della struttura, in grado di generare campi elettromagnetici e tensioni indotte pericolose).

Riguardo alle prime, esse attraversano completamente o parzialmente l'impianto fotovoltaico (fulminazione diretta) causando effetti devastanti: moduli fotovoltaici e dispositivi elettronici fuori uso, cavi da sostituire, componenti e collegamenti da verificare e talvolta danni a persone e cose situate all'interno degli edifici collegati tramite i cavi agli impianti.

Nel caso di fulminazione indiretta, invece, l'impianto non è interessato dalla corrente di fulmine, in quanto la scarica atmosferica si abbatte nelle vicinanze, ma il forte campo elettromagnetico di tipo impulsivo originato dal fenomeno, concatenandosi con i collegamenti, soprattutto esterni, può generare sovratensioni di notevole intensità.

La nuova normativa CEI 62305-1/4, riguardante la protezione contro i fulmini, a differenza di quella precedente, impone di considerare il rischio dovuto alle scariche atmosferiche nei suoi vari aspetti, considerando anche la destinazione d'uso della struttura interessata.

3.Manutenzione

La manutenzione degli impianti fotovoltaici è strettamente legata alla taglia, alle tecnologie utilizzate ed ai componenti installati. Nel caso degli impianti di grande taglia in cui i ricavi dalla vendita dell'energia elettrica sono ingenti e, quindi, la disponibilità degli impianti (continuità di esercizio) è una necessità dell'investitore, la manutenzione è regolata da un contratto che stabilisce cosa e quando mantenere e le implicazioni che un fermo impianto per guasto implica. In genere, il compito della redazione di questi contratti è lasciata alle aziende installatrici degli impianti in quanto conoscono meglio quanto hanno installato.

Questi contratti si compongono di tre attività:

- monitoraggio da remoto delle condizioni di esercizio;
- piano di manutenzione ordinaria preventiva;
- intervento di manutenzione straordinaria correttiva di guasti o malfunzionamenti che influenzino l'esercizio, realizzati in conformità ad una tempistica di intervento concordata ed in armonia con una copertura di un'eventuale polizza "All Risk" accesa sull'impianto (la tempistica è un parametro contrattuale).

L'attivazione di questo pacchetto di attività garantisce che la disponibilità dell'impianto sia la più alta possibile (manutenzione ordinaria preventiva), che i guasti vengano individuati nel minor tempo possibile (monitoraggio remoto) e i malfunzionamenti rilevati vengano sistemati con un intervento tempestivo; tutte azioni mirate ad aumentare il più possibile la disponibilità degli impianti.

Le attività di manutenzione ordinaria preventiva sono consigliate con cadenza al minimo annuale (semestrale nel caso di impianti isolati) e comprendono una serie di ispezioni e controlli. La maggior parte delle verifiche possono essere effettuate anche da personale inesperto in tecnologie fotovoltaica purché addestrato ad operare su circuiti elettrici applicando le norme di sicurezza e, comunque, non senza aver preso visione del "Manuale d'uso e manutenzione" redatto dal progettista e consegnato al cliente insieme al progetto esecutivo. I controlli coinvolgono la seguente componentistica: moduli, stringhe, struttura di sostegno, quadri elettrici, batteria di accumulatori (se presente e di tipo VLA), convertitore statico e collegamenti elettrici.

L'affidabilità dei sistemi fotovoltaici è, in genere, piuttosto alta a patto che si seguano alcune accortezze durante la progettazione. L'esperienza dimostra che il componente del sistema attualmente meno affidabile è il convertitore statico. Al contrario, il generatore fotovoltaico è risultato il più affidabile: qualora avvenisse un malfunzionamento (per esempio, diodi di bypass guasti o montati con polarità invertite), lo si individuerrebbe all'atto della prima messa in servizio. Essendo molto delicata, la batteria degli accumulatori è un elemento del quale occorre prendersi cura sia a livello progettuale, facendo in modo di rispettarne nel limite del possibile la metodologia di carica, che a livello manutentivo. Sulla base di queste premesse, per i piccoli impianti, in genere le parti a scorta sono relative ai componenti dei quadri elettrici che possono guastarsi a seguito di malfunzionamenti transitori come i fusibili, i diodi di blocco o gli scaricatori di sovratensione.

La manutenzione ordinaria post realizzazione impianto si basa su una serie di controlli raccolti nella Check List applicabile a grandi impianti a terra ma, con le opportune e naturali semplificazioni, applicabile anche ai piccoli letti fotovoltaici.

4. Normativa e disposizioni legislative

Sempre più spesso la stesura di progetti tecnici è caratterizzata da frequenti richiami alle normative vigenti e alle disposizioni di legge adottate come linea guida. Nel campo della promozione e diffusione di pubblicazioni inerenti l'aspetto normativo del settore elettrotecnico ed elettronico diversi organismi sono attivi su vari livelli: nazionale, europeo, internazionale. Ognuno concentra gruppi di esperti (comitati tecnici) su varie tematiche tecniche, i quali rappresentano, a titolo gratuito, enti, imprese e società che possono avere un diretto interesse strategico nel settore specifico. I lavori consistono nel contribuire alla discussione delle tematiche e problematiche nel settore di interesse nel tentativo di arrivare alla definizione di standard di qualità e sicurezza adeguati al progresso tecnologico e sempre armonizzati a livello internazionale.

Vediamo i principali organismi normatori elettrotecnici ed elettronici che possono interessare all'azienda che deve installare l'impianto solare:

4.1. CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano)

L'attività del CEI è quella di redigere “specifiche tecniche la cui rilevanza giuridica è riconosciuta dalla legge n° 186 del 1/3/1968, e che hanno lo scopo di stabilire i requisiti che devono avere gli impianti, i materiali, gli apparecchi, i macchinari, i circuiti, i processi e i loro programmi, affinché possano considerarsi rispondenti alla regola d'arte” che oggi ha anche una connotazione di progettazione sicura nei confronti dell'ambiente e, soprattutto, dell'uomo. Nonostante da anni siano in vigore disposizioni legislative spesso tecnicamente, sebbene mai completamente, armonizzabili fra loro, giuridicamente le norme CEI si sono ormai imposte rispetto ad una legislazione indubbiamente obsoleta.

4.2.CENELEC (Comitato Europeo di Normazione Elettrica)

Il CENELEC è l'organismo con sede a Bruxelles che ha lo scopo di creare un corpo unico di norme nel settore elettrico ed elettrotecnico per l'Unione Europea ai fini della libera circolazione dei prodotti, nel rispetto della sicurezza delle persone, dei beni e dell'ambiente. Inoltre, è in grado di operare anche su incarico della Commissione Europea. Il CENELEC emette norme europee siglate EN che devono essere obbligatoriamente adottate a livello di ogni singola nazione che deve provvedere a ritirare tutte le normative nazionali eventualmente in contrasto.

4.3.IEC (Comitato Elettrotecnico Internazionale)

L'IEC è l'organismo normatore su scala mondiale nel campo elettrico e elettrotecnico; prepara norme tecniche in inglese/francese (talvolta in tedesco) che vengono adottate dopo essere passate al vaglio dei comitati nazionali. In Italia, le pubblicazioni IEC anticipano le CEI che, generalmente, ne sono la traduzione in italiano con alcune modifiche.

CAPITOLO 5

Valorizzazione dell'energia fotovoltaica ed analisi economico-finanziaria degli impianti

1.Remunerazione

La valorizzazione economica dell'energia prodotta da un impianto fotovoltaico si compone, oltre che dalla parte relativa all'energia prodotta, la quale è remunerata mediante tariffa incentivante, anche da quanto attiene l'utilizzo successivo: autoconsumo, vendita o scambio sul posto.

L'energia elettrica prodotta da un impianto fotovoltaico viene quindi, in prima istanza, misurata all'uscita del gruppo di conversione (inverter) per essere valorizzata in conto energia mediante la tariffa incentivante. Tale remunerazione in conto energia (R_c) risulta essere pari a: $R_c = \text{Energia prodotta} * \text{Tariffa incentivante}$.

Successivamente, la stessa energia può essere in parte autoconsumata, andando quindi a costituire un risparmio (R_a) pari a: $R_a = \text{Energia autoconsumata} * \text{Prezzo di acquisto dell'energia}$.

Tuttavia, non sempre è possibile autoconsumare tutta l'energia prodotta e, quindi, in questi casi, occorre prevedere che una parte più o meno consistente di energia possa essere venduta. Vi sono poi impianti dedicati unicamente alla vendita, per i quali la frazione autoconsumata è trascurabile rispetto al totale. In entrambi i casi la vendita di energia alla rete dà luogo ad una remunerazione (R_v), da calcolarsi come: $R_v = \text{Energia venduta} * \text{Prezzo di vendita dell'energia}$.

La remunerazione complessiva (R_t) dell'energia prodotta da un impianto fotovoltaico è allora pari a: $R_t = R_c + R_a + R_v$.

Se la potenza dell'impianto fotovoltaico supera i 20 kWp (kilowatt picco, un'[unità di misura](#), non riconosciuta dal [SI](#), della potenza teorica massima producibile da un generatore elettrico o, viceversa, la potenza teorica massima assorbibile da un carico elettrico) è possibile accedere al regime di scambio sul posto, attraverso il quale l'energia prodotta è

considerata tutta autoconsumata, a patto che su base annua il consumo non sia inferiore alla produzione.

Lo scambio sul posto, quando risulta possibile, è conveniente poiché il prezzo di acquisto dell'energia è quasi sempre superiore al prezzo di vendita. Tuttavia, tale convenienza viene rapidamente a mancare se l'energia prodotta diventa superiore a quella consumata perché non è prevista alcuna remunerazione dei surplus. Considerando lo scambio sul posto correttamente applicato, la remunerazione corrispondente (R_s) risulta pari a: $R_s = \text{Energia prodotta} * \text{Prezzo d'acquisto dell'energia}$.

In questo caso la remunerazione complessiva (R_t) diventa pari a: $R_t = R_c + R_s$.

Si noti che l'energia prodotta non è stata raccolta a fattor comune poiché nei calcoli economici le tariffe e i prezzi utilizzati variano nel tempo in modo differente e, quindi, in generale, non possono essere utilizzati allo stesso modo.

2.Tariffa incentivante del conto energia

La tariffa incentivante diminuisce all'aumentare della classe di potenza dell'impianto e del livello di integrazione architettonica, premiando l'impianto parzialmente integrato e, ancor di più, quello integrato. La tariffa incentivante è riconosciuta per un periodo di 20 anni a decorrere dalla data di entrata in esercizio dell'impianto ed è costante in moneta corrente per tutto il periodo.

Per gli impianti fotovoltaici operanti in regime di scambio sul posto e che alimentano, anche parzialmente, utenze ubicate all'interno, o asservite, a unità immobiliari di edifici, è prevista l'applicazione di un premio aggiuntivo abbinato all'esecuzione di interventi che conseguono una riduzione del fabbisogno energetico. Tale premio consiste in una maggiorazione percentuale della tariffa pari alla metà della percentuale di riduzione del fabbisogno di energia conseguita e certificata. In nessun caso la percentuale può superare il 30% della tariffa riconosciuta alla data di entrata in esercizio degli impianti. Per gli anni successivi al 2010 le tariffe sono ridefinite con appositi decreti interministeriali, in mancanza dei quali si continueranno ad applicare le tariffe definite per gli impianti che entrano in esercizio nel 2010.

3.Ritiro dedicato

Il ritiro dedicato è una modalità semplificata a disposizione dei produttori per la vendita dell'energia elettrica immessa in rete, in alternativa ai contratti bilaterali o alla vendita diretta in borsa. Consiste nella cessione dell'energia elettrica immessa in rete al Gestore dei Servizi Energetici – GSE S.p.A. (GSE), che provvede a remunerarla, corrispondendo al produttore un prezzo per ogni kWh ritirato.

Al GSE è attribuito il ruolo di:

- soggetto che ritira commercialmente l'energia elettrica dai produttori aventi diritto e la rivende sul mercato elettrico;
- utente del dispacciamento e del trasporto in immissione relazionato alle unità di produzione nella disponibilità dei produttori;
- interfaccia unica, in sostituzione del produttore, verso il sistema elettrico, tanto per la compravendita di energia quanto per i principali servizi connessi.

Possono richiedere l'accesso al regime di ritiro dedicato gli impianti alimentati da fonti rinnovabili e non rinnovabili che rispondano alle seguenti condizioni:

- potenza apparente nominale inferiore a 10 MVA alimentati da fonti rinnovabili (compresa la produzione imputabile delle centrali ibride);
- potenza qualsiasi per impianti che producano energia elettrica dalle seguenti fonti rinnovabili: eolica, solare, geotermica, del moto ondoso, maremotrice, idraulica (limitatamente agli impianti ad acqua fluente);
- potenza apparente nominale inferiore a 10 MVA alimentati da fonti non rinnovabili (compresa la produzione non imputabile delle centrali ibride);
- potenza apparente nominale uguale o superiore a 10 MVA, alimentati da fonti rinnovabili diverse dalla fonte eolica, solare, geotermica, del moto ondoso, maremotrice e idraulica, limitatamente, per quest'ultima fonte, agli impianti ad acqua fluente, purché nella titolarità di un autoproduttore.

4. Analisi economico-finanziaria di un impianto di grande taglia

Si presenta di seguito un Business Plan relativo alla realizzazione di un impianto fotovoltaico:

- I ricavi dalla vendita dell'energia prodotta si sommano economicamente con l'incentivo pubblico erogato dal GSE.
- L'investimento prevede un rischio imprenditoriale contenuto in quanto i flussi di cassa sono garantiti dalla presenza dell'incentivo valido per 20 anni e dal contratto di cessione di energia alla rete (per 30 anni rinnovabile) stipulato con il gestore locale per tutta la durata del servizio dell'impianto.
- La leva finanziaria per lo schema di supporto è ottenibile presso gli istituti di credito o società di leasing che spesso dispongono di prodotti già definiti.
- Il rischio tecnico è strettamente legato alla scelta dei partner tecnologici: risulta quindi necessario essere accorti nella stesura dei contratti e avere la capacità di negoziare i termini di qualità dei prodotti e le garanzie di fornitura in funzione delle prestazioni nel tempo.
- La performance economica del progetto è circoscritta agli oneri legati alle immobilizzazioni materiali in quanto gli altri parametri significativi che animano i flussi di cassa sono vincolati.

Oltre a ciò, le ipotesi di analisi sono relative a:

- Esercizio e manutenzione: la bancabilità dell'iniziativa è anche legata all'accensione di un contratto di manutenzione con garanzia di disponibilità dell'impianto e penali per il mancato raggiungimento degli obiettivi contrattuali: è possibile stipulare contratti di manutenzione in caso di guasto per gli anni seguenti ai primi 2, stabiliti legalmente, in garanzia estesa. L'esercizio completamente automatico dell'impianto non prevede presidio e quindi nessuna spesa di personale in sito. Per un corretto funzionamento e per assicurare un alto livello di disponibilità è indispensabile predisporre il telecontrollo da remoto e l'elaborazione dei dati di esercizio in modalità 7/24 (giornaliero/tutte le ore).
- Vita utile dell'impianto: il Business Plan può predisporre un piano di valutazione sui successivi 20 anni (legato alla durata dell'incentivo), sui 25 anni (legato alla garanzia rilasciata da parte del Costruttore sulla prestazione del generatore fotovoltaico) o sui 30 anni (legato all'affitto dei terreni).

Se, per esempio, prendiamo in esame i 20 anni:

- Tempistica di realizzazione: un impianto di grande taglia (>100 kW), installato sulle coperture, esige tempi di installazione di circa 1,5 mesi a MW. A questi si devono aggiungere i tempi di Design & Procurement stimati in circa 4 mesi, per un totale di 6 mesi. Ovviamente impianti di alcuni megawatt hanno tempi di realizzazione non proporzionali.
- Piano di committenza: si è ipotizzato di realizzare l'opera attraverso un General Contractor ed un contratto EPC (Engineering, Procurement & Construction) con garanzia sul Performance Ratio di 2 anni dall'entrata.
- Breakdown dei costi: si assume una posa a schiera dei moduli FV sulla copertura e la necessità di realizzazione di una cabina secondaria MT/BT con una minima estensione della rete.
- Assunzioni tecniche, economiche e finanziarie: si è fatta l'ipotesi di un finanziamento dell'iniziativa con il 20% di equità ed un numero di ore equivalenti di sole pari a 1350.

5. Analisi di sensibilità sul TIR di progetto

L'analisi di sensibilità è opportuno che sia condotta sui due parametri che influenzano maggiormente gli indici economici di prestazione dell'iniziativa:

- prezzo di acquisto del modulo fotovoltaico;
- ore equivalenti di sole.

Questo tipo di analisi deve essere sempre condotta in sede di costruzione dell'iniziativa fotovoltaica, in quanto le ore equivalenti di sole sono legate all'irraggiamento del sito che, a seconda della banca dati utilizzata, può subire delle variazioni. Per semplicità, l'analisi di sensibilità è sviluppata per il solo indice economico TIR.

Si osserva quindi che:

- variazioni anche importanti del prezzo del modulo fotovoltaico portano a variazioni piuttosto contenute del TIR % sul totale;

- la localizzazione dell'impianto sul territorio italiano ha un impatto importante sulla redditività dell'iniziativa.

Da ultimo, va osservato che, alla luce dell'importanza della localizzazione dell'impianto e di come le condizioni ambientali possano influire sulle varie tecnologie fotovoltaiche disponibili sul mercato, risulta sempre indispensabile procedere alla redazione di più Business Plan con più tecnologie per valutare quale sia quello che porta ad ottenere le performance finanziarie migliori.

CAPITOLO 6

Attualità

1. Innovazione e sostenibilità economica

Negli ultimi anni la sostenibilità ambientale sta acquisendo un'importanza sempre maggiore per l'uomo e per la sua futura sopravvivenza. Quest'importanza è dovuta soprattutto al ruolo che l'ecosostenibilità ricopre all'interno del progetto di salvaguardia del nostro pianeta che proprio in questo nuovo millennio sta riportando dati relativi all'inquinamento sempre più allarmanti. Tuttavia, "se non si mette sullo stesso piano questa sostenibilità di tipo ambientale con quella di tipo economica si rischia di commettere un grosso errore" (Gaetano Fasano, 2015): infatti, se ieri si faceva riferimento a fonti di tipo fossili (facilmente gestibili e quantificabili), oggi si parla di fonti rinnovabili (discontinue e non programmabili). Le problematiche che questo fatto comporta vanno ad intaccare l'equilibrio del sistema energetico che, di conseguenza, andrebbe totalmente rivoluzionato con cambiamenti nel campo dell'innovazione tecnologica e non solo.

L'innovazione in questo campo è necessaria in quanto le fonti rinnovabili sono la risorsa energetica del domani: chi non entra in competizione (se non lo è già attualmente) e non sta al passo con l'evoluzione energetica in corso rischia di trovarsi tagliato fuori, nel cosiddetto deserto industriale.

È un fatto ben noto che le centrali elettriche a fonti rinnovabili sono in via di sviluppo ed è sempre più evidente il loro affermarsi sulle vecchie tecnologie delle centrali termoelettriche. A prova di ciò si ha l'esistenza del capacity payment: quest'ultimo è un contributo dato dallo Stato alle centrali termoelettriche per compensare le perdite economiche subite a causa dello sviluppo delle fonti rinnovabili, fonti per definizione intermittenti e non perfettamente prevedibili, come già citato. Si tratta quindi di una forma di compensazione economica.

"In Italia la situazione non è tra le migliori: di impianti eolici e fotovoltaici ve ne sono pochi e quasi tutta l'energia viene fornita dall'estero, i fondi scarseggiano e, per quanto riguarda l'innovazione e la ricerca, si fatica a condividere i risultati ottenuti e le tecnologie. Tutto questo a causa di 'gelosie' e malfunzionamento dei sistemi informatici che devono far fronte

al fatto che il 95% delle imprese sono di piccola-media dimensione e presentano meno di 15 dipendenti” (Federico Testa, 2015)

2.Chi offre soluzioni

Si riporta di seguito l'esempio di un'azienda italiana che offre una serie di servizi ad altre aziende che hanno bisogno di cambiare il proprio assetto energetico e devono decidere come usare le proprie liquidità; si tratta di un grosso investimento iniziale, soprattutto per le piccole e medie imprese che alle volte non si lasciano convincere dalla sola prospettiva di risparmi futuri.

Ricapitolando, nel momento in cui un'azienda decide di investire in un impianto fotovoltaico deve rivolgersi a quelle aziende specializzate nella produzione di pannelli fotovoltaici che solitamente garantiscono anche servizi di montaggio e manutenzione dell'impianto stesso.

Prendiamo Enerpoint (www.enerpoint.it) come esempio di “azienda che offre”:

“Enerpoint, pioniere del solare da oltre 11 anni, è in prima linea per promuovere questo cambio di paradigma.

Vantaggi derivanti dall'installazione di un impianto fotovoltaico sono molteplici:

- sei al riparo dai rincari sulla bolletta dell'energia
- risparmi fino al 70% sulle bollette di luce e gas
- con la detrazione IRPEF il fotovoltaico costa la metà
- aumenta il valore della tua casa
- il fotovoltaico aiuta a proteggere l'ambiente dalle emissioni di CO2
- alla detrazione fiscale si può associare lo scambio sul posto, che permette di avere energia low cost.

Il know how e l'esperienza Enerpoint ci permettono di offrire prodotti delle migliori marche presenti sul mercato, progettando l'impianto secondo le esigenze del cliente, dopo un attento studio di fattibilità e un sopralluogo tecnico. Installiamo soluzioni fotovoltaiche chiavi in mano attraverso i nostri Installatori. Autorizzati, i

migliori presenti in Italia, che vantano anni di esperienza e massima affidabilità e che abbiamo formato direttamente attraverso i nostri corsi di formazione e aggiornamento.”

Inoltre il sito di Enerpoint offre la possibilità di farsi un'idea dell'impianto e dei costi/risparmi tramite un simulatore online.

Questa, come molte altre aziende di questo settore, offre numerose agevolazioni economiche, soprattutto alle piccole e medie imprese e, in particolar modo, per impianti di tipo fotovoltaico.

Vediamo nel seguente paragrafo un'azienda, una situazione, un piano energetico e una realtà che si distaccano decisamente da quelli descritti finora.

3.Chi ha agito

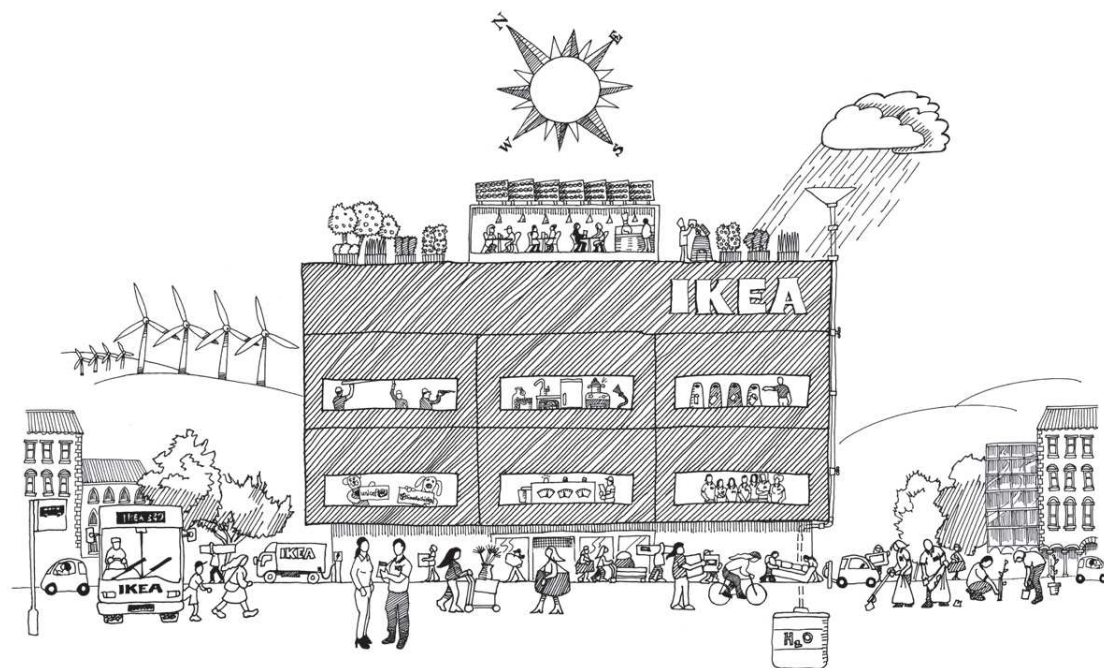


Figura 6.3.1 – Il viaggio dell'azienda Ikea verso la sostenibilità

Un esempio di azienda che vanta grossi investimenti nel settore del fotovoltaico e non solo (figura 6.3.1) è sicuramente l'azienda Ikea: infatti, nel loro Sustainability Report del 2014 affermano che “We are working hard to meet our goal of energy independence. By the end of

2015, we aim to have invested and committed to invest EUR 1.5 billion in renewable energy projects, mainly offsite wind farms and photovoltaic (PV) panels installed on our buildings. We have already committed to own and operate 224 wind turbines and have installed 700,000 solar panels on our buildings. We contribute to the development of renewable energy by:

- Investing in our own power generation equipment, including offsite wind turbines, on-site biomass boilers and on-site solar panels. This helps us work towards becoming energy independent.
- Purchasing renewable electricity to supply our stores and other buildings (not included as part of our energy independence goals)".

In particolare si riportano di seguito i dati (Mario Barrile, 2015) relativi all'impianto fotovoltaico installato sul tetto del magazzino Ikea situato presso Piacenza (figura 6.3.2):

- 66.528 pannelli fotovoltaici Q Cells in silicio policristallino
- Oltre il 100% del fabbisogno annuo
- 1,99 MWp di potenza sul DC1
- 4,99 MWp sul DC2
- 6,98 MWp totali che fanno dell'impianto una delle più grandi installazioni fotovoltaiche presenti in Italia.



Figura 6.3.2 – Impianto fotovoltaico magazzino Ikea presso Piacenza

4.Prestiti e agevolazioni

Un'azienda che decide di investire nel fotovoltaico ha, come già detto, molte agevolazioni e numerosi prestiti a disposizione; in particolare, per tornare alla realtà italiana, fornirebbe un contesto più completo riportare alcune informazioni circa un fondo che negli ultimi anni si è rivelato di grande aiuto, soprattutto per le piccole e medie imprese che hanno deciso di investire nelle fonti rinnovabili: si tratta di Fondo Energia. "Il Fondo Energia è un fondo rotativo di finanza agevolata a compartecipazione privata finalizzato al finanziamento della green economy. Il Fondo agevola gli investimenti destinati all'aumento dell'efficienza energetica, alla produzione di energia da fonti rinnovabili e alla realizzazione di impianti tecnologici che consentano la riduzione dei consumi energetici da fonti tradizionali" (Nicola Gobbi, 2015).

Inoltre nel sito si specifica che (www.fondoenergia.eu):

"Approvato dalla Regione Emilia-Romagna con Deliberazioni di Giunta n. 1419/2011 e n. 65/2012, il Fondo è dotato di un plafond iniziale di 9,5 milioni di euro provenienti da risorse a valere sull'Asse 3 del Por Fesr 2007-2013 'Qualificazione energetico-ambientale e sviluppo sostenibile' (Attività III.1.3).

I beneficiari sono piccole e medie imprese (ex Raccomandazione 2003/361/CE del 06/05/2003 e D.M. 18/04/2005 - G.U. 238 del 12/10/2005 - Definizione), aventi localizzazione produttiva in Emilia-Romagna. Le imprese non dovranno risultare 'Imprese in difficoltà' ai sensi della definizione di cui agli Orientamenti comunitari sugli aiuti di stato per il salvataggio e la ristrutturazione di imprese in difficoltà".

CONCLUSIONI

Non vi sono dubbi sul fatto che il fotovoltaico diventerà uno dei principali motori di energia del futuro.

Ovviamente, come sottolineato nella trattazione, il fotovoltaico non è una soluzione priva di imperfezioni e molte sono ancora le migliorie da apportare; primi fra tutti vanno risolti i problemi legati allo smaltimento e al riciclaggio dei pannelli: questi vanno contro la filosofia stessa del fotovoltaico, mettendo in dubbio la sua ecosostenibilità.

Tuttavia, le difficoltà più grosse che l'impianto solare presenta sono quasi certamente destinate ad essere risolte grazie all'evoluzione tecnologica del XXI secolo di cui siamo diretti o indiretti protagonisti.

Dalla trattazione appare evidente i suoi punti di forza sono più numerosi delle sue criticità e non possono passare inosservati: l'apparentemente alto costo iniziale è ben compensato e ammortizzato negli anni grazie al fatto che una volta installato l'impianto non sono più necessarie ulteriori spese, fatta eccezione per l'eventuale manutenzione; quest'ultima, peraltro, può essere garantita tramite accordi con le stesse aziende che vendono i pannelli (a titolo d'esempio Enerpoint). Le aziende che decidono di investire nel fotovoltaico, oltre alle agevolazioni che potremmo definire standard (remunerazione e tariffa incentivante in conto energia), possono vantare ulteriori prestiti loro dedicati (vedasi l'esempio di Fondo Energia riportato all'ultimo capitolo).

Esempi di aziende che hanno investito nel fotovoltaico ce ne sono molti; ho deciso di riportare l'esempio dell'IKEA poiché è per me molto significativo (è un colosso aziendale noto per la sua capacità di coniugare, come poche altre aziende, utile ed efficacia con coscienza ambientale).

Certamente, in Italia le piccole e medie imprese faticano non poco a rivoluzionare il loro assetto energetico, viste anche le difficoltà economiche che si trovano ad affrontare in questo periodo; tuttavia, come riportato negli ultimi capitoli, esistono oggi molte agevolazioni, prestiti e, in generale, aiuti economici per tutte quelle aziende che vogliano investire nelle fonti d'energia rinnovabili e che o non sono propense, perché tendenzialmente restie a cambiamenti così radicali del loro assetto energetico, oppure sono 'spaventate' dagli alti costi iniziali.

Tali atteggiamenti sono spesso una conseguenza degli inefficienti e/o scarsi mezzi di comunicazione utilizzati per aggiornare queste imprese su quanto detto finora che, di conseguenza, non risultano sempre ben informate su quella che è la dinamica evolutiva della tecnologia, potenzialmente a loro disposizione. Il miglioramento di questi mezzi di comunicazione potrebbe essere, a parer mio, un ottimo punto di partenza da cui cominciare, per porre un fantastico mezzo di risparmio energetico, quale penso che sia il fotovoltaico, nelle mani degli imprenditori italiani.

Alcuni paesi europei, invece, come la Francia, la Germania o, in generale, i paesi del nord Europa, sono già ben consci del percorso evolutivo che le risorse rinnovabili permettono. I loro governi hanno intuito che l'investimento oggi in queste risorse garantirebbe la

sopravvivenza domani, quando tutte le fonti non rinnovabili saranno finite, non senza aver rafforzato in modo quasi irreversibile il disastro ambientale da loro generato sulla terra: un cancro che già oggi esiste, di cui molti parlano ma che pochi prendono sul serio.

BIBLIOGRAFIA

- Groppi F., Zuccaro C., 2005, *Impianti solari fotovoltaici a norme CEI*, Milano (MI), Italia: Editoriale Delfino.

- Caffarelli A., De Simone G., 2010, *Principi di progettazione dei sistemi solari fotovoltaici*, Santarcangelo di Romagna (RN), Italia: Maggioli Editore.
- Rota S., 2005, *Elettricità dal Sole*, Albino (BG), Italia: Sandit Libri.
- Gianfreda M., 2013, "Caratterizzazione statistica dell'energia accumulata da sorgente fotovoltaica per sistemi di comunicazione mobile".
- Testa F., 17 novembre 2015, "Cambiamenti climatici e sostenibilità: il contributo dell'Innovazione e del trasferimento tecnologico", convegno presso Palazzo Bo (PD).
- Fasano G., 24 novembre 2015, "Efficienza energetica nelle imprese: scenari e opportunità nazionali", conferenza al Tecnopolo di Faenza (RA).
- Gobbi N., 24 novembre 2015, "Fondo Energia opportunità e risorse a sostegno di politiche energetiche di imprese ed enti", conferenza al Tecnopolo di Faenza (RA).
- Barrile M., 1 dicembre 2015, Sustainability specialist IKEA Italia Retail Srl Padova.
- IKEA Group, 2014, Sustainability report, pp. 52.
- Fotovoltaico Nord Italia (<http://www.fotovoltaiconorditalia.it/idee/capacity-payment>),
13 dicembre 2015
- ENEA (<http://www.enea.it>),
14 dicembre 2015
- Enerpoint (<http://www.enerpoint.it>),
19 dicembre 2015
- Fonodo Energia (<http://www.fondoenergia.eu>),
23 dicembre 2015