

Vincenzo Scimeca

IMPIANTI FOTOVOLTAICI

DAL SOPRALLUOGO ALLA REALIZZAZIONE

TERZA EDIZIONE

AGGIORNATA AL D.M. 5 MAGGIO 2011 (QUARTO CONTO ENERGIA)

CD-ROM INCLUSO

3 progetti di impianti fotovoltaici: 4,8 kWp, 52,8 kWp, 93,38 kWp; Schemi elettrici in CAD;
Modulistica; Schede di raccolta dati; Normativa di riferimento; Documenti fotografici



GRAFILL

Vincenzo Scimeca

IMPIANTI FOTOVOLTAICI – DAL SOPRALLUOGO ALLA REALIZZAZIONE

ISBN 13 978-88-8207-445-6

EAN 9 788882 074456

Formulari & Guide, 28

Terza edizione, settembre 2011

Scimeca, Vincenzo <1976->

Impianti fotovoltaici : dal sopralluogo alla realizzazione / Vincenzo Scimeca.

– 3. ed. – Palermo : Grafill, 2011.

(Formulari & guide ; 28)

ISBN 978-88-8207-445-6

1. Impianti solari – Progettazione.

621.47 CDD-22

SBN Pal0236056

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail grafill@grafill.it

Finito di stampare nel mese di settembre 2011

presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

Indice

PREFAZIONE	p.	7
PRESENTAZIONE	"	9
INTRODUZIONE	"	11
1. FONDAMENTI GENERALI E PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	"	14
1.1. La radiazione solare	"	14
1.2. Il principio fotovoltaico	"	15
1.3. Il processo produttivo	"	18
1.4. Tecnologia: silicio monocristallino, policristallino, amorfo.....	"	19
1.5. Modulo fotovoltaico	"	21
1.6. Inverter	"	26
1.7. Impianto fotovoltaico isolato "stand alone".....	"	30
1.8. Impianto fotovoltaico connesso alla rete "grid connected"	"	35
2. PROGETTAZIONE E DIMENSIONAMENTO	"	37
2.1. Il sopralluogo	"	37
2.2. Dimensionamento di un sistema fotovoltaico	"	41
2.3. Componenti di un sistema fotovoltaico.....	"	44
2.4. Messa a terra	"	50
2.5. Protezione dai fulmini	"	51
2.6. Le fasi progettuali	"	53
2.7. Autorizzazioni e permessi.....	"	57
2.8. Dimensionamento mediante software: i configuratori	"	58
3. MONTAGGIO E MESSA IN SERVIZIO DI UN IMPIANTO DA 4,8 KWP: CASO PRATICO	"	60
3.1. Premessa.....	"	60
3.2. Montaggio delle strutture di supporto	"	61

3.3.	Montaggio dei moduli.....	p.	63
3.4.	Lavorare in sicurezza sulle coperture.....	"	65
3.5.	Posa dei cavi in corrente continua.....	"	66
3.6.	Quadri elettrici: cablaggio e posa in opera.....	"	68
3.7.	Montaggio e collegamento dell'inverter.....	"	70
3.8.	Allaccio alla rete elettrica e attivazione dell'impianto.....	"	73
3.9.	Collaudo, gestione e manutenzione.....	"	75
4.	MONTAGGIO E MESSA IN SERVIZIO		
	DI UN IMPIANTO DA 52,8 KWP: CASO PRATICO	"	78
4.1.	Premessa.....	"	78
4.2.	Montaggio delle strutture di supporto.....	"	79
4.3.	Montaggio dei moduli.....	"	81
4.4.	Quadri elettrici: cablaggio e posa in opera.....	"	83
4.5.	Collaudo.....	"	85
5.	MONTAGGIO E MESSA IN SERVIZIO		
	DI UN IMPIANTO DA 93,38 KWP: CASO PRATICO	"	87
5.1.	Premessa.....	"	87
5.2.	Montaggio delle strutture di supporto.....	"	87
5.3.	Montaggio dei moduli.....	"	88
5.4.	Quadri elettrici: cablaggio e posa in opera.....	"	90
5.5.	Sistemi di allarme.....	"	91
6.	CONSIDERAZIONI ECONOMICHE:		
	PROGRAMMI DI INCENTIVAZIONE E FINANZIAMENTI	"	93
6.1.	Considerazioni economiche ed ambientali.....	"	93
6.2.	Perché promuovere il fotovoltaico.....	"	93
6.3.	Il mercato fotovoltaico in Italia: opportunità e sviluppo.....	"	94
6.4.	Il sistema di incentivazione: il "Terzo Conto Energia".....	"	95
6.5.	I costi di un impianto fotovoltaico ed il ritorno economico dell'investimento.....	"	98
6.6.	L'assicurazione dell'impianto: polizze assicurative "all risk".....	"	102
6.7.	Contratto di manutenzione e gestione.....	"	102
6.8.	Finanziamenti per gli impianti fotovoltaici.....	"	104
6.9.	Aspetti fiscali.....	"	105
7.	COME PREDISPORRE UNA PRATICA:		
	ITER REALIZZATIVO	"	110
7.1.	Principali norme.....	"	110
7.2.	Iter di realizzazione di un impianto fotovoltaico.....	"	111
7.3.	Le autorizzazioni.....	"	111

7.4. Connessione alla rete elettrica	p.	114
7.5. Misura dell'energia elettrica e contratti.....	"	115
7.6. Officina elettrica.....	"	117
7.7. Richiesta incentivo in conto energia.....	"	117
APPENDICE LEGISLATIVA	"	123
Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico 10 settembre 2010 <i>Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili.</i>	"	123
Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico 5 maggio 2011 <i>Incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti solari fotovoltaici.</i>	"	153
Regole applicative per il riconoscimento delle tariffe incentivanti previste dal D.M. 5 maggio 2011 (Quarto Conto Energia per il fotovoltaico) – Luglio 2011	"	184
Guida alle applicazioni innovative finalizzate all'integrazione architettonica del fotovoltaico (Quarto Conto Energia) – D.M. 5 maggio 2011.....	"	210
GUIDA ALL'INSTALLAZIONE E ALL'USO DEL SOFTWARE	"	224
Introduzione.....	"	224
Requisiti minimi hardware e software	"	224
Richiesta della "password utente"	"	224
Procedura per l'installazione del software	"	224
Procedura per la registrazione del software	"	225
Procedura per l'uso del software	"	225
BIBLIOGRAFIA	"	226

Prefazione

L'importanza del ruolo che rivestono le energie rinnovabili per lo sviluppo economico del Paese, e in particolare del Mezzogiorno, richiede grande attenzione e studio sul tema.

Un tema destinato a riguardare un numero sempre maggiore di persone, che sul fotovoltaico investono, come mezzo attraverso cui realizzare in tempi ragionevoli un ritorno economico, o che sul fotovoltaico credono, come fonte pulita d'energia, alternativa a quella, nociva ed esauribile, rappresentata oggi dal petrolio. È lo sviluppo economico sostenibile: "uno sviluppo – lo scrive lo stesso autore nella sua introduzione – che soddisfi i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni".

Ed è proprio dalla commistione di questi fondamentali elementi di carattere economico, sociale ed ambientale che discende l'importanza primaria del fotovoltaico e il conseguente dovere di grande attenzione e studio ad esso dovuti.

Anche da parte della politica, che deve porsi seriamente il problema di come regolamentare, in via definitiva e senza sobbalzi destabilizzanti, un settore che ha in sé diverse e diversificate implicazioni, ma che non può non essere considerato come il presente e l'immediato futuro dell'approvvigionamento energetico del Paese, specie dopo l'abiura nuclearista a mezzo referendum.

L'autore, da parte sua, con questa pubblicazione, ha assolto appieno a quel dovere, producendo un testo che riesce ad illustrare, con chiarezza "solare" e dovizia di particolari, un mondo così complesso e, ai più, ancora sconosciuto. La sua lettura potrà costituire un supporto prezioso per tutti coloro che, per diversi motivi e a diverso titolo, si troveranno ad accostarsi al fotovoltaico. E c'è da scommetterci: sono già tanti e saranno sempre di più. Quindi, una lettura utilissima, che, sebbene tecnica e settoriale, è destinata ad un'ampia platea, ponendo l'accento su tutti gli aspetti relativi alla realizzazione di un impianto, sia propedeutici che conseguenti: dagli aspetti tecnici a quelli operativi (con una rassegna completa di tutto ciò che è all'uopo necessario); dagli aspetti burocratici (e qui non sfugge l'elefantiasi cui è purtroppo costretta anche la green economy) a quelli più strettamente pecuniari (soprattutto con una completa panoramica sul sistema d'incentivazione e di finanziamento da parte degli istituti di credito); dagli aspetti ambientali ("i motivi per promuovere lo sviluppo del fotovoltaico

sono diversi – scrive Scimeca – primo fra tutti l’aspetto ambientale”) a quelli sociali (con un focus dettagliato sugli sviluppi occupazionali connessi).

Fare dell’economia verde un valore, non solo economico, distribuito a tutti i cittadini. Questa è la frontiera a cui deve tendere la parte più propositiva e coscienziosa del nostro Paese: il libro di Vincenzo Scimeca può certamente rappresentare una guida utile per quanti intraprendano questo viaggio.

On. Gianfranco Micciché
Sottosegretario alla Presidenza
del Consiglio dei Ministri

Presentazione

Una nuova edizione a pochi mesi dalla pubblicazione della seconda edizione si è resa necessaria in quanto è stato abrogato il D.M. 6 agosto 2010 (terzo conto energia) sostituito, dopo alcuni mesi di attesa, con il D.M. 5 maggio 2011 “Incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti solari fotovoltaici” (quarto conto energia) (G.U.R.I. 12-05-2011, n. 109) che regolerà il meccanismo delle tariffe incentivanti concesse dal GSE (Gestore dei Servizi Energetici) dal 1° giugno 2011 al 31 dicembre 2016.

Il Governo con il “quarto conto energia” ha voluto dare uno slancio definitivo al settore fotovoltaico, introducendo alcune novità, tra le principali l’ambizioso obiettivo di 23.000 MW di potenza installata al 2016, la riduzione progressiva e differenziata delle tariffe incentivanti a partire dal 1° giugno 2011 ed un limite massimo di potenza annua cumulata per i “grandi impianti” che dovranno richiedere al GSE l’iscrizione ad un apposito registro informatico.

Nessun limite invece per i piccoli impianti fotovoltaici ovvero gli impianti realizzati su edifici che hanno una potenza non superiore a 1.000 kW o gli “altri impianti” con potenza non superiore a 200 kW operanti in regime di scambio sul posto, nonché gli impianti fotovoltaici di potenza qualsiasi realizzati su edifici ed aree delle Amministrazioni Pubbliche.

È previsto inoltre un premio di 5 centesimi di euro sulla tariffa incentivante in caso di impianti fotovoltaici che sostituiranno coperture in amianto ed un premio del 10% per gli impianti fotovoltaici con un costo di investimento, per quanto riguarda i componenti diversi dal lavoro, che sia almeno per il 60% riconducibile ad una produzione realizzata all’interno dell’Unione Europea.

Al fine di dare al testo un taglio pratico, sono illustrati tre casi pratici: nel capitolo 3 sono illustrate le fasi di realizzazione di un impianto fotovoltaico da 4,8 kWp al servizio di un’abitazione privata, nel capitolo 4 vengono invece descritte le fasi di realizzazione di un impianto fotovoltaico da 52,8 kWp al servizio di un oleificio, nel capitolo 5 infine le fasi di realizzazione di un impianto fotovoltaico da 93,38 kWp al servizio di un’azienda agricola.

Quest’ultimo caso, per la presenza di più edifici non adiacenti tra loro e con diverso orientamento ed inclinazione, ha richiesto un complesso lavoro di progettazione e di installazione.

Gli impianti presentati si trovano nel comune di Caccamo (PA), sono già connessi alla rete elettrica di Enel e beneficiano delle tariffe incentivanti del "secondo conto energia" (D.M. 19 febbraio 2007).

Le realizzazioni sono state eseguite da Enersystems S.r.l., azienda siciliana che dal 2007 opera nel settore occupandosi della progettazione, installazione, collaudo e manutenzione di impianti fotovoltaici, sia per il settore privato che per quello aziendale.

Il testo è stato suddiviso in 7 capitoli, dal principio di funzionamento alla predisposizione completa di una pratica, trattando anche gli aspetti economici e i recenti riferimenti normativi in ambito alle autorizzazioni per la costruzione e l'esercizio degli impianti.

Il CD-ROM allegato oltre ai riferimenti normativi aggiornati, alle schede di raccolta dati, alla modulistica ed alla documentazione fotografica, contiene anche gli schemi elettrici ed i progetti relativi ai casi pratici presentati nel testo. La documentazione è in formato adatto ad essere prontamente utilizzata da quanti, tecnici e progettisti del settore, ricercano informazioni pratiche, utili alla progettazione e alla messa in opera dei sistemi fotovoltaici, che derivano dall'esperienza diretta nel settore.

Ing. Vincenzo Scimeca
Amministratore Unico ENERSYSTEMS S.r.l.

Introduzione

Il programma di incentivi per il settore fotovoltaico, avviato in Italia nel 2005 e nel 2006 ed in maniera incisiva nel 2007 con il decreto ministeriale 19 febbraio 2007, ha fatto registrare una crescita esponenziale e permesso il raggiungimento di un traguardo ambizioso.

A parte un blocco temporaneo ed una fase di incertezze, causate dal passaggio dal D.M. 6 agosto 2010 (terzo conto energia) al D.M. 5 maggio 2011 (quarto conto energia), risultano già in esercizio 231.279 impianti per una potenza complessiva di oltre 7.200 MW (fonte www.gse.it – luglio 2011).

Il 90% della potenza complessiva è costituito da impianti fotovoltaici di piccola taglia (1-20 kW), è chiaro quindi che il meccanismo di incentivazione è stato utilizzato soprattutto dalle famiglie e dalle aziende che hanno come principale scopo quello di abbattere i propri consumi energetici.

Una fotografia della situazione in Sicilia vede, a luglio 2011, un totale di 13.069 impianti fotovoltaici di cui: 12.163 impianti per una potenza di circa 67 MW nella fascia di potenza 1-20 kW, 293 impianti per una potenza di circa 12 MW nella fascia di potenza 20-50 kW, infine 613 impianti per una potenza di circa 340 MW nella fascia di potenza oltre 50 kW.

Questa situazione, perfettamente in linea con la situazione nazionale, rivela un fatto molto importante, cioè che il 93% del numero di impianti sono di piccola taglia (1-20 kW) ma in termini di potenza complessiva rappresentano soltanto il 16% circa, mentre gli impianti fotovoltaici di taglia superiore a 50 kW, seppure rappresentino appena il 5% in termini di numero totale di impianti, costituiscono oltre l'80% della potenza totale cumulata.

Il quarto conto energia (D.M. 5 maggio 2011) ha posto dei limiti alla realizzazione di grandi impianti fotovoltaici al fine di consentire una distribuzione degli incentivi che veda maggiormente favoriti gli impianti fotovoltaici al servizio di privati e di aziende che esercitino lo scambio sul posto e che utilizzino i tetti delle proprie abitazioni e dei propri stabilimenti.

Ci si augura che in futuro possa crescere il numero di impianti al servizio delle aziende maggiormente "energivore", soprattutto di quelle aziende ubicate nelle zone industriali dove generalmente non ricorrono nemmeno i problemi di connessione alla

rete elettrica che invece spesso si riscontrano nelle zone rurali a causa delle linee elettriche obsolete o sottodimensionate.

Il futuro sviluppo del mercato fotovoltaico dipenderà infatti anche dallo sviluppo e potenziamento della rete elettrica nazionale. Sarà necessario integrare gli impianti fotovoltaici alla rete di trasmissione e distribuzione, trasformando le reti elettriche esistenti in sistemi "intelligenti" (Smart Grid) in grado di accogliere l'energia non programmabile, conciliando i sistemi tradizionali di generazione centralizzati con quelli distribuiti, tipici delle fonti rinnovabili. Il concetto di Smart Grid prevede una rete elettrica globale in cui opereranno insieme sistemi di generazione centralizzati e distribuiti, in cui le reti elettriche saranno trasformate in un sistema articolato ed interconnesso le cui caratteristiche principali sono: flessibilità, sicurezza, efficienza, ottimizzazione, economicità, bi-direzionalità.

Allo stato attuale sono già in corso degli interventi sulla rete elettrica italiana per il trasporto dell'energia da fonte rinnovabile. Lo scorso 18 giugno del 2010, a Milano, in un convegno organizzato dal GIF (Gruppo Imprese Fotovoltaiche Italiane), Terna ha presentato alcuni dei progetti in corso e illustrato il piano di sviluppo della rete elettrica, che prevede le interconnessioni con l'estero (Montenegro e Tunisia). Ha inoltre presentato l'ambizioso progetto DESERTEC, ovvero l'interconnessione delle reti elettriche Europee con quelle del Nord Africa e dei Balcani.

In ambito alle Smart Grid emerge che saranno necessarie ingenti somme per la ricerca e lo sviluppo e che la strada da percorrere probabilmente è ancora lunga, ma ciò rappresenta una delle sfide tecnologiche per il futuro energetico mondiale.

Il programma degli incentivi per il fotovoltaico vedrà comunque una nuova fase grazie al decreto ministeriale del 5 maggio 2011 "Incentivazione della produzione di energia elettrica da impianti solari fotovoltaici", che permetterà una ulteriore crescita economica, sociale e prospettive promettenti per il futuro del settore.

Nel 2010 infatti il mercato fotovoltaico italiano ha fatto registrare un fatturato di circa 3,5 miliardi di euro ed ha contribuito a creare nuovi posti di lavoro (20.000 in soli 4 anni).

Un impianto fotovoltaico installato sulla propria abitazione o al servizio della propria azienda consente infatti di risparmiare immediatamente sui costi sostenuti per la bolletta dell'energia elettrica, consentendo un bilancio positivo immediato e un guadagno nel lungo periodo, grazie alle tariffe incentivanti garantite per 20 anni.

Il tempo di ritorno economico dell'investimento in un impianto fotovoltaico viene valutato in funzione del costo dell'impianto e dei ricavi da esso derivanti, ovvero dalla tariffa incentivante e dal risparmio o dalla vendita dell'energia elettrica prodotta. Poiché i ricavi sono direttamente legati alla produzione elettrica annua che un impianto è in grado di sviluppare, è chiaro che il ritorno economico dell'investimento risulta più rapido nel caso di impianti installati nelle regioni meridionali.

Nelle regioni del sud infatti la radiazione solare è superiore rispetto alle regioni del centro-nord, prendendo infatti come riferimento un impianto da 1 kW di potenza nominale, con orientamento ed inclinazione ottimali ed in assenza di ombreggiamento, in Italia è possibile stimare le seguenti producibilità annue: regioni settentrionali 1.000-

1.100 chilowattora all'anno (kWh/anno); regioni centrali 1.200–1.300 chilowattora all'anno; regioni meridionali 1.400-1.500 chilowattora all'anno.

Il fotovoltaico rappresenta quindi un ottimo investimento e nel contempo anche una risposta concreta al problema dello sviluppo sostenibile, cioè uno “sviluppo che soddisfi i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni”.

Capitolo 1

Fondamenti generali e principio di funzionamento

1.1. La radiazione solare

Il sole, come tutti i corpi caldi, emette una radiazione elettromagnetica chiamata radiazione solare, che scaturisce dai processi di fusione dell'idrogeno contenuto nello stesso. La radiazione solare costituisce il combustibile principale di tutti i processi vitali del pianeta terra.

La potenza della radiazione elettromagnetica incidente sull'unità di superficie prende il nome di *irraggiamento solare* che può essere misurato con appositi strumenti (piranometro o solarimetro).

L'irraggiamento solare all'esterno dell'atmosfera prende il nome di *costante solare* ed è pari a 1367 watt al metro quadro (W/m^2). Nell'attraversare l'atmosfera terrestre la radiazione solare si attenua venendo in parte dispersa ed in parte assorbita. La radiazione che giunge al suolo è quindi la risultante di una componente *diretta*, di una *diffusa* e di una *riflessa* (figura 1).

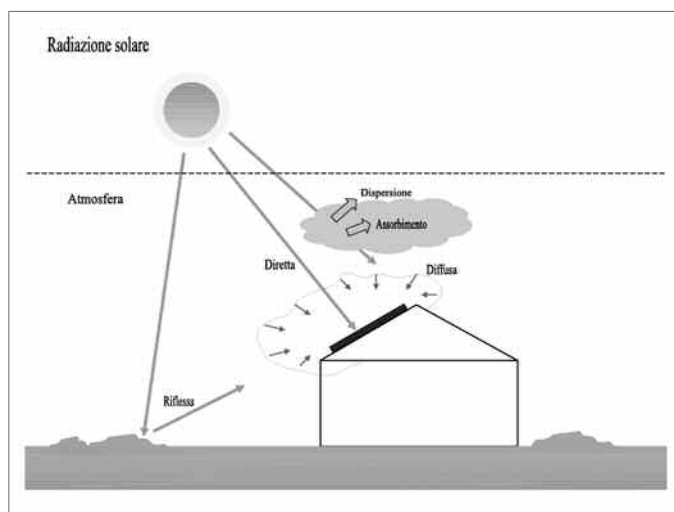


Figura 1. La radiazione solare

D'inverno la componente diffusa è molto maggiore di quella diretta e su base annua può arrivare a rappresentare circa il 50% della radiazione solare globale. La radiazione riflessa dipende dal coefficiente di albedo (coefficiente di riflessione), che è funzione dell'ambiente circostante (asfalto, erba, ecc.). L'intensità della radiazione solare al suolo dipende inoltre dall'angolo di inclinazione della radiazione stessa (vedi figura 1) e quindi dalla localizzazione geografica (latitudine, longitudine). La radiazione solare varia quindi in funzione dell'orientamento e dell'inclinazione. Per massimizzare l'energia captata nell'arco dell'anno, con riferimento alle latitudini italiane, l'angolo di inclinazione ottimale è di 30° con orientamento a sud. Nella figura 2 è riportato lo scostamento percentuale dell'irraggiamento solare al variare dell'inclinazione e dell'orientamento cardinale.

ORIENTAMENTO	INCLINAZIONE (orizzontale = 0° – verticale = 90°)						
Sud = 0° Est/Ovest = 90°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0°	0,89	0,97	1,00	0,99	0,93	0,83	0,69
15°	0,89	0,96	1,00	0,98	0,93	0,83	0,69
30°	0,89	0,96	0,99	0,97	0,92	0,82	0,70
45°	0,89	0,94	0,97	0,95	0,90	0,81	0,70
60°	0,89	0,93	0,94	0,92	0,87	0,79	0,69
75°	0,89	0,91	0,91	0,88	0,83	0,76	0,66
90°	0,89	0,88	0,87	0,83	0,78	0,71	0,62

Figura 2. Energia solare al variare dell'orientamento e dell'inclinazione (fonte Enerpoint)

1.2. Il principio fotovoltaico

La conversione diretta dell'energia della radiazione solare in energia elettrica, realizzata con la cella fotovoltaica, utilizza il fenomeno fisico dell'interazione della radiazione luminosa con gli elettroni di valenza nei materiali semiconduttori, denominato appunto effetto fotovoltaico. Qualunque sia il materiale impiegato (silicio o altro), il meccanismo con cui la cella trasforma la luce solare in energia elettrica è sempre lo stesso. Per semplicità si considera il caso in cui la cella fotovoltaica sia costituita da silicio cristallino: normalmente l'atomo di silicio possiede 14 elettroni, 4 dei quali sono elettroni di valenza, che quindi possono partecipare alle interazioni con gli altri atomi, sia di silicio sia di altri elementi. Due atomi affiancati di un cristallo di silicio puro, hanno in comune una coppia di elettroni, uno dei quali appartenente all'atomo considerato e l'altro appartenente all'atomo vicino (figura 3).

Esiste quindi un forte legame elettrostatico fra un elettrone e i due atomi che esso contribuisce a tenere uniti. Tale legame può essere però spezzato da una certa quantità di energia: se l'energia fornita è sufficiente, l'elettrone viene portato ad un livello ener-

getico superiore (banda di conduzione), dove è libero di spostarsi, contribuendo così al flusso di elettricità. Quando passa alla banda di conduzione, l'elettrone si lascia dietro una "buca", cioè una lacuna dove manca un elettrone. L'elettrone vicino può andare facilmente a riempire la buca, scambiandosi così di posto con essa. Per sfruttare l'elettricità, occorre creare un moto continuo di elettroni (e quindi di buche), ovvero una corrente mediante un campo elettrico interno alla cella. Il campo si realizza con particolari trattamenti fisici e chimici, creando un eccesso di atomi caricati positivamente in una parte del semiconduttore, ed un eccesso di atomi caricati negativamente nell'altra parte.

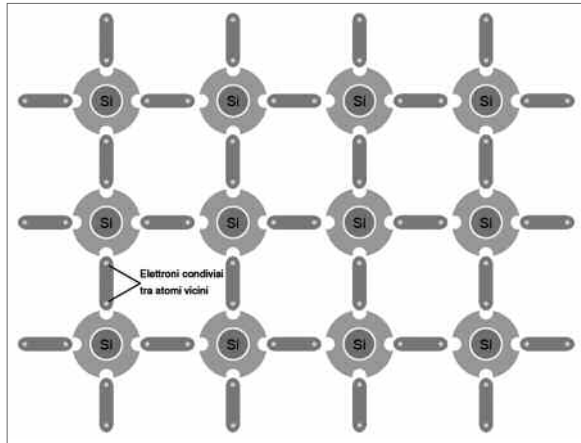


Figura 3. *Struttura atomica di una cella di silicio* (fonte www.ecojoule.it)

Tale condizione si ottiene, in pratica, immettendo piccole quantità di atomi di boro (carichi positivamente) e di fosforo (carichi negativamente) nel reticolo di silicio, ovvero effettuando il "drogaggio" del semiconduttore (figura 4).

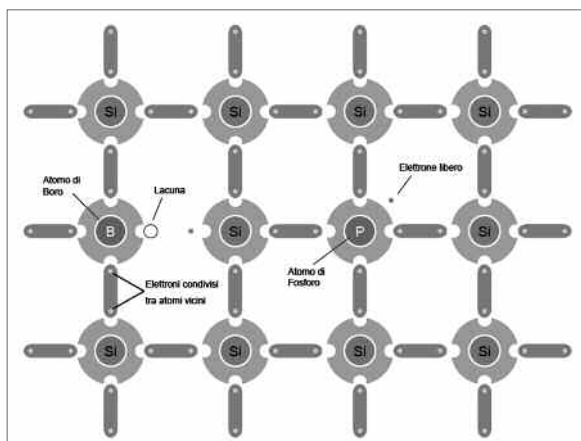


Figura 4. *Drogaggio del silicio con atomi di boro e di fosforo* (fonte www.ecojoule.it)

L'attrazione elettrostatica fra le due specie atomiche crea un campo elettrico fisso che dà alla cella la struttura detta "a diodo", in cui il passaggio della corrente, costituita da portatori di carica liberi, gli elettroni, è ostacolato in una direzione e facilitato in quella opposta. L'incidenza della radiazione solare causa la separazione delle cariche elettriche positive e negative presenti nella giunzione, generando una differenza di potenziale, per cui chiudendo il circuito con un carico elettrico, si genera un passaggio di corrente elettrica (figura 5).

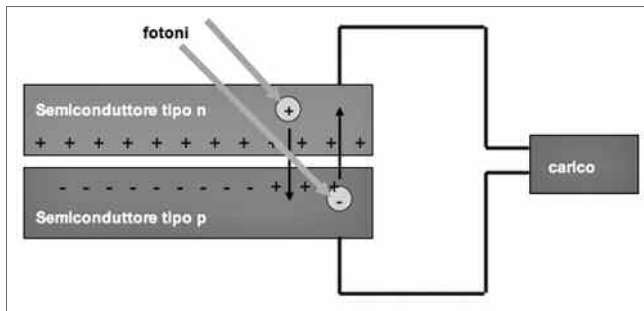


Figura 5. Giunzione p-n (fonte www.tuttotetto.it)

Si tenga presente inoltre che solo una parte dello spettro solare a livello del suolo risulta utile per la conversione fotovoltaica (vedi figura 6): l'energia solare convertibile teoricamente in energia elettrica è pari al 44% circa.

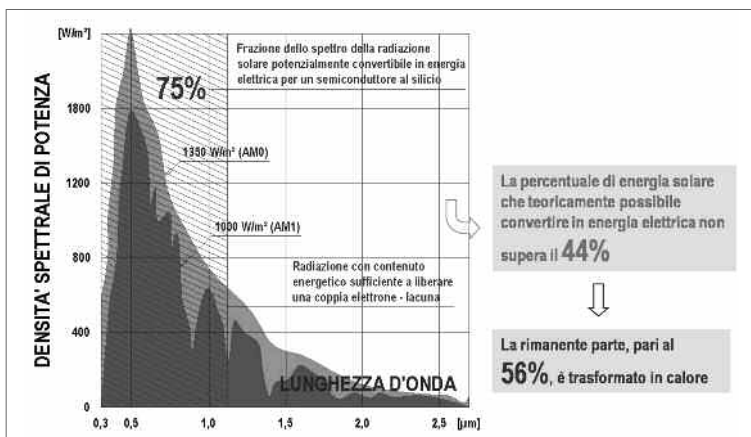


Figura 6. Spettro solare (www.newenergysnc.it)

Nella pratica poi l'efficienza di una cella è di appena il 14-18% in quanto una ulteriore parte della radiazione solare non ha energia sufficiente per penetrare all'interno della cella. L'efficienza della cella dipende inoltre anche dal tipo di silicio (monocristallino, policristallino, amorfo, ecc.).

1.3. Il processo produttivo

Come si è già detto il silicio cristallino è il materiale semiconduttore maggiormente usato per la produzione di celle fotovoltaiche anche se presenta elevati costi di produzione. Le tecniche industriali permettono di produrre due diverse tipologie di silicio: monocristallino e policristallino. La tecnica maggiormente utilizzata per la produzione dei singoli cristalli di silicio da materiale fuso è la **tecnica Czochralski**. Introdotta nei sistemi produttivi industriali agli inizi degli anni '50, tale tecnica permette di ottenere blocchi di silicio di estrema purezza a forma di cilindro. Il processo prende il nome dal ricercatore polacco Jan Czochralski, che lo scoprì nel 1916 mentre stava studiando la cristallizzazione dei metalli.

L'apparato utilizzato per tale tecnica (figura 7) è costituito principalmente da una fornace con un crogiolo di silicio puro fuso nel quale viene immerso un "seme" monocristallo di silicio che, dopo essere stato posto a contatto con la miscela fusa, viene successivamente estratto e lentamente raffreddato. La solidificazione genera un monocristallo di grandi dimensioni (figura 8).

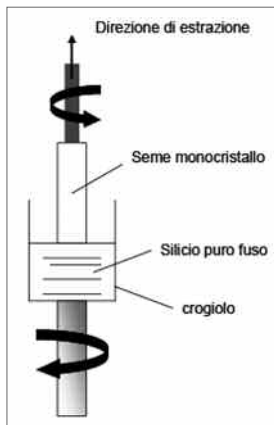


Figura 7. *Tecnica Czochralski*



Figura 8. *Monocristallo di silicio (fonte globalwarming)*

Il seme monocristallino è, in pratica, una bacchetta con sopra un sottile strato di silicio in forma monocristallina. Gli atomi di silicio fuso, a contatto con il *seme monocristallino*, si orientano secondo il reticolo atomico della struttura del silicio; si tratta di un processo simile alla formazione di un cristallo di quarzo, ma con la differenza che in natura un cristallo di quarzo si forma in milioni di anni, mentre con questo processo di laboratorio un "pane" di silicio monocristallino si ottiene in pochi giorni.

Al termine del processo il materiale ha la forma di un lingotto cilindrico del diametro di 10-12,5 centimetri, lunghezza di un metro ed appare di colore grigio. Il cristallo viene quindi tagliato mediante un disco diamantato per ottenere fette (wafers) dal diametro di 10-12,5 centimetri e dello spessore di 200 μm .

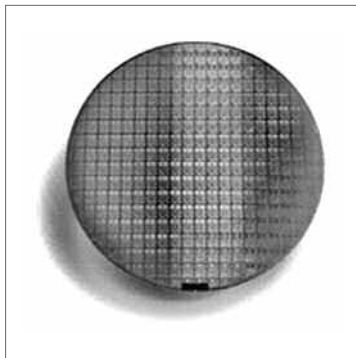


Figura 9. Wafer di silicio (fonte digilander)

La conversione dei wafers in celle fotovoltaiche finite avviene in tre fasi:

- una tessitura chimica della superficie per produrre piramidi che riducono la perdita di energia per riflessione;
- drogaggio, ovvero formazione di una giunzione p-n mediante aggiunta alle celle delle impurità desiderate ad alta temperatura, in genere fosforo e boro;
- l'ultima fase è la metallizzazione della cella, cioè l'applicazione sul fronte e sul retro, di contatti metallici.

Dopo che le celle sono prodotte singolarmente, vengono interconnesse usando strisce metalliche come interconnettori. Per ovvi problemi di costo, nel corso degli anni sono stati sviluppati alcuni materiali alternativi al silicio monocristallino.

Un materiale alternativo è il silicio policristallino, la cui tecnica di produzione è il **Wacher ingot facturing process (WICP)**, invece del metodo Czochralski.

Il WICP usa due differenti contenitori per la fusione e la ricristallizzazione. Il processo consiste nel fondere il silicio precedentemente purificato in un crogiolo al quarzo e di porlo, dopo la fusione, in uno stampo preriscaldato. Dopo un processo di solidificazione si ottiene un "pane" di 150-200 chilogrammi. Questo blocco solidificato viene tagliato con lastre seganti in lingotti con forma di parallelepipedo e successivamente in wafers (o substrati) di spessore di circa 300 μm . Seguiranno le fasi precedentemente descritte per la conversione di questi wafers in celle.

1.4. Tecnologia: silicio monocristallino, policristallino, amorfo

Nel paragrafo precedente si è trattato brevemente dei processi produttivi per la realizzazione di celle al silicio. In questo paragrafo vengono trattate le principali tecnologie in uso attualmente disponibili sul mercato e quelle in fase di studio.

Sulla base di questo materiale, il silicio appunto, si distinguono fondamentalmente tre diverse categorie di celle (figura 11):

- celle in silicio monocristallino;
- celle in silicio policristallino;

- celle a film sottile: silicio amorfo, diseleniuro di rame e indio (CIS), tellurio di cadmio (CdTe), arseniuro di gallio (GaAs).

Attualmente circa il 93% della produzione mondiale è costituita dai moduli in silicio cristallino. La quota di mercato delle celle a film sottile è del 6,2% circa, di cui il 4,5% si riferisce alle celle in silicio amorfo ed il restante 1,7% alle altre tipologie (diseleniuro di rame e indio, tellurio di cadmio, ecc.).

I materiali vengono poi classificati in base alla loro efficienza. Di seguito si riporta una tabella riepilogativa (figura 10) sull'efficienza dei moduli (rendimento) e sulla superficie necessaria per l'installazione di 1 kWp (chilowatt di picco) in funzione del tipo di materiale utilizzato.

Materiale della cella	Efficienza del modulo	Superficie necessaria per 1 kWp
<i>Monocristallino</i>	11-17%	5-8 m ²
<i>Policristallino</i>	10-15%	7-9 m ²
<i>Diseleniuro di rame e indio</i>	6-9%	10-13 m ²
<i>Amorfo</i>	5-7%	14-20 m ²

Figura 10. Tabella riepilogativa dei tipi di celle attualmente in commercio

Come si può notare i moduli in silicio monocristallino e policristallino hanno maggiori efficienze anche in termini di minore spazio occupato, il che è particolarmente apprezzabile nelle applicazioni in ambito residenziale dove la disponibilità di superficie spesso è limitata. Le celle a film sottile in diseleniuro di rame e indio (CIS) o in tellurio di cadmio (CdTe) rappresentano oggi una buona alternativa al silicio, anche se dispongono di un'efficienza minore. A fronte della necessità di una maggiore superficie utile, le suddette celle a film sottile hanno alcuni vantaggi rispetto alle celle in silicio cristallino, cioè di tollerare meglio gli ombreggiamenti e di essere meno influenzate dalla temperatura (a tal proposito vedasi paragrafo 1.5.).

Le celle in silicio amorfo sono realizzate in silicio non in forma cristallina e quindi privo di una struttura regolare. Queste celle presentano pertanto una bassa efficienza, dell'ordine del 4-7% e sono quelle che in genere vengono usate per il funzionamento di calcolatrici tascabili e orologi da polso. Il processo di produzione della cella in silicio amorfo prevede il deposito tramite vapori di silicio su una lastra di supporto in vetro.



Figura 11. Cella in silicio amorfo, monocristallino e policristallino (fonte Enel)