



FACOLTÀ DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA



Laurea in Architettura

DICAAR

**CORSO DI IMPIANTI PER LA SOSTENIBILITA' ENERGETICA
DEGLI EDIFICI**

A.A. 2020/21 – primo semestre

Gli impianti solari fotovoltaici

Slide 1-82

Docente: ROBERTO RICCIU

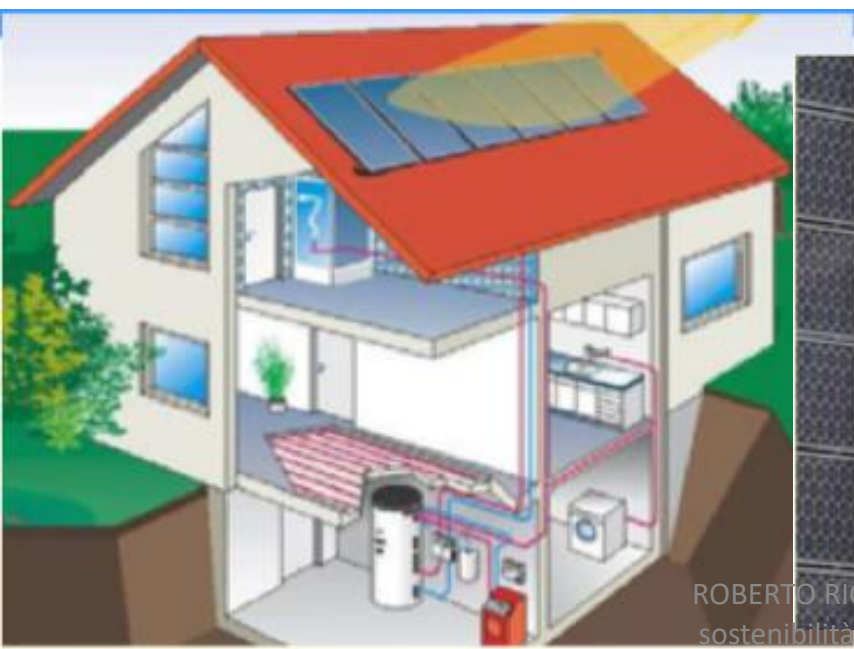
Gli impianti solari fotovoltaici



Figura 3.3
Pensilina fotovoltaica a Roma
(Fonte: <http://www.archilovers.com/p66865/PENSILINE-FOTOVOLTAICHE-bike-sharing>)



La tecnologia fotovoltaica a servizio dell'edificio



Gli impianti solari fotovoltaici

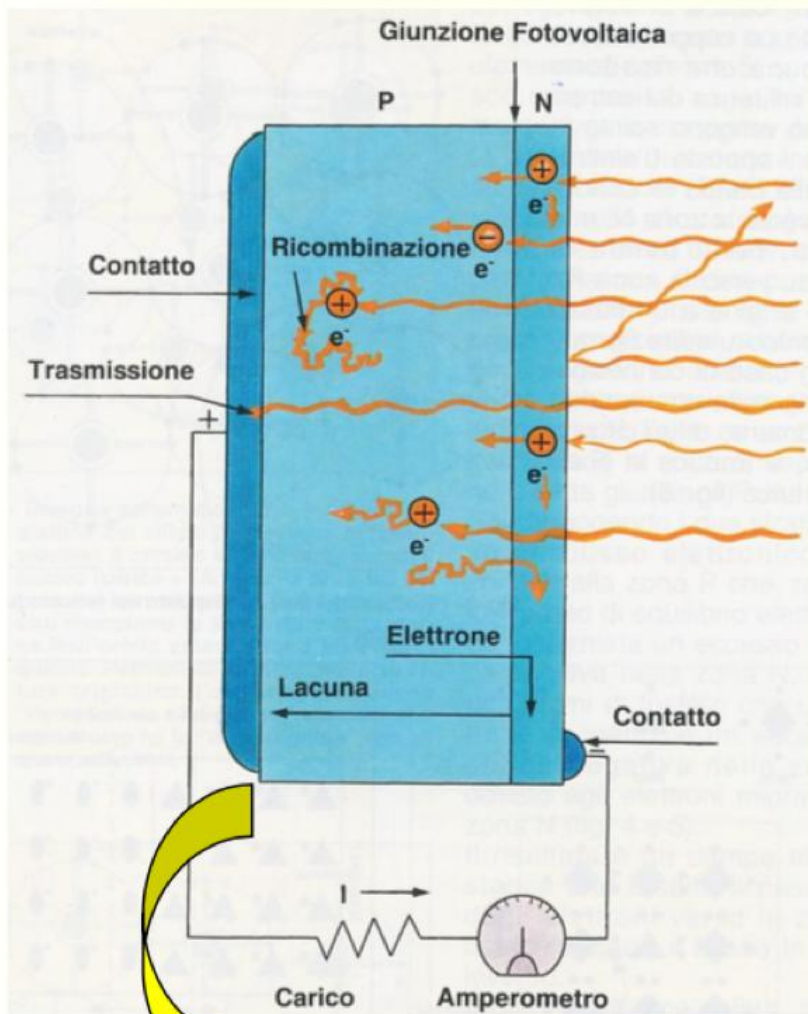
- **Il generatore**
 - La conversione fotovoltaica 5
 - I materiali 18
 - Tradizionali 18
 - Nuove tecnologie 25
 - La realizzazione 25
 - Efficienze 29
 - Il fotovoltaico a concentrazione 33
- **Gli impianti** 33
 - Il datasheet del generatore 35
 - Idoneità del sito 40
 - Radiazione teorica 44
 - Rilievo delle ombre 47
 - Metodologia di calcolo 48
 - Valutazione della producibilità 55
 - Normativa elettrica 58
- Il progetto** 59
 - Scelta di Tensione/corrente/inverter 59
 - Disposizione delle stringhe 80

Gli impianti solari fotovoltaici

- **l'integrazione con l'edificio esistente**
 - www.fosterinmed.eu
 - <http://www.fosterinmed.eu/index.php/component/attachments/download/43>
 - <http://www.fosterinmed.eu/index.php/component/attachments/download/44>

Gli impianti solari fotovoltaici

La conversione fotovoltaica



Effetto fotonico: generazione stimolata di portatori di carica

I fotoni che compongono la radiazione luminosa vengono assorbiti dagli elettroni nell'interfaccia che acquistano energia sufficiente per rompere i legami e divenire portatori di carica

$$I = I_L - I_J$$

Gli impianti solari fotovoltaici

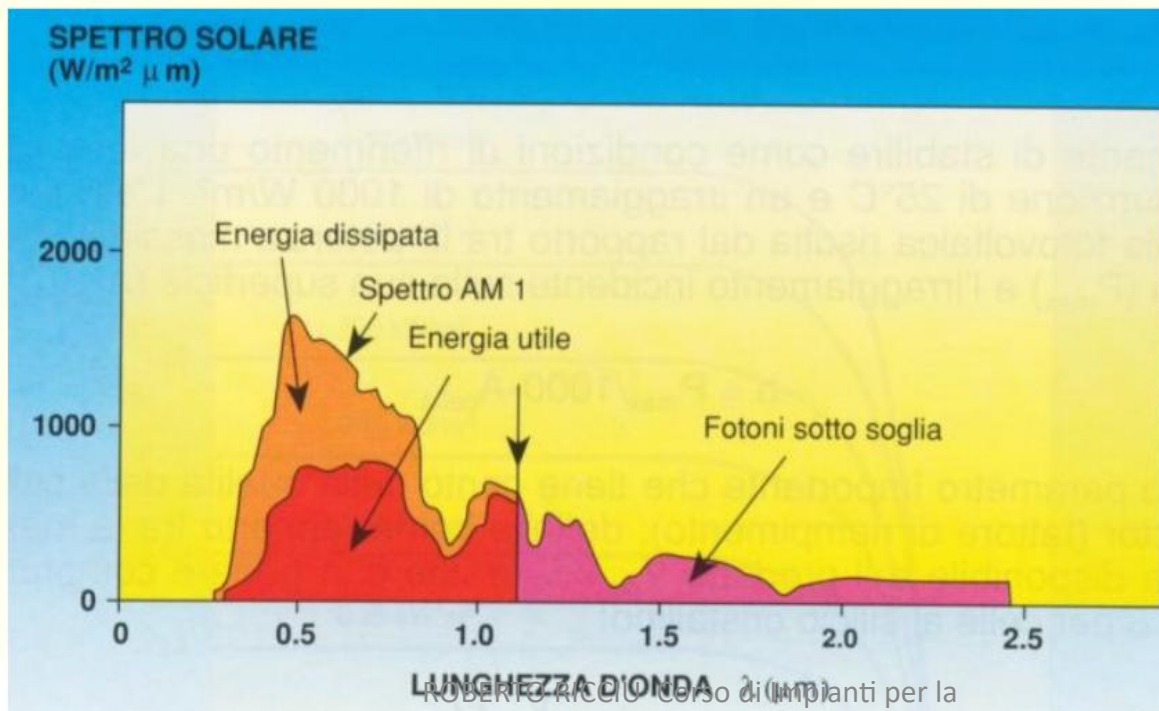
La conversione fotovoltaica

L'assorbimento dei fotoni

Saranno assorbiti solo i fotoni con lunghezza d'onda λ tale che:

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} > E_{\text{gap}}$$

Costante di Plank
Velocità della luce
Lunghezza d'onda



ROBERTO RICCI - corso di impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici A.A.
2020-21

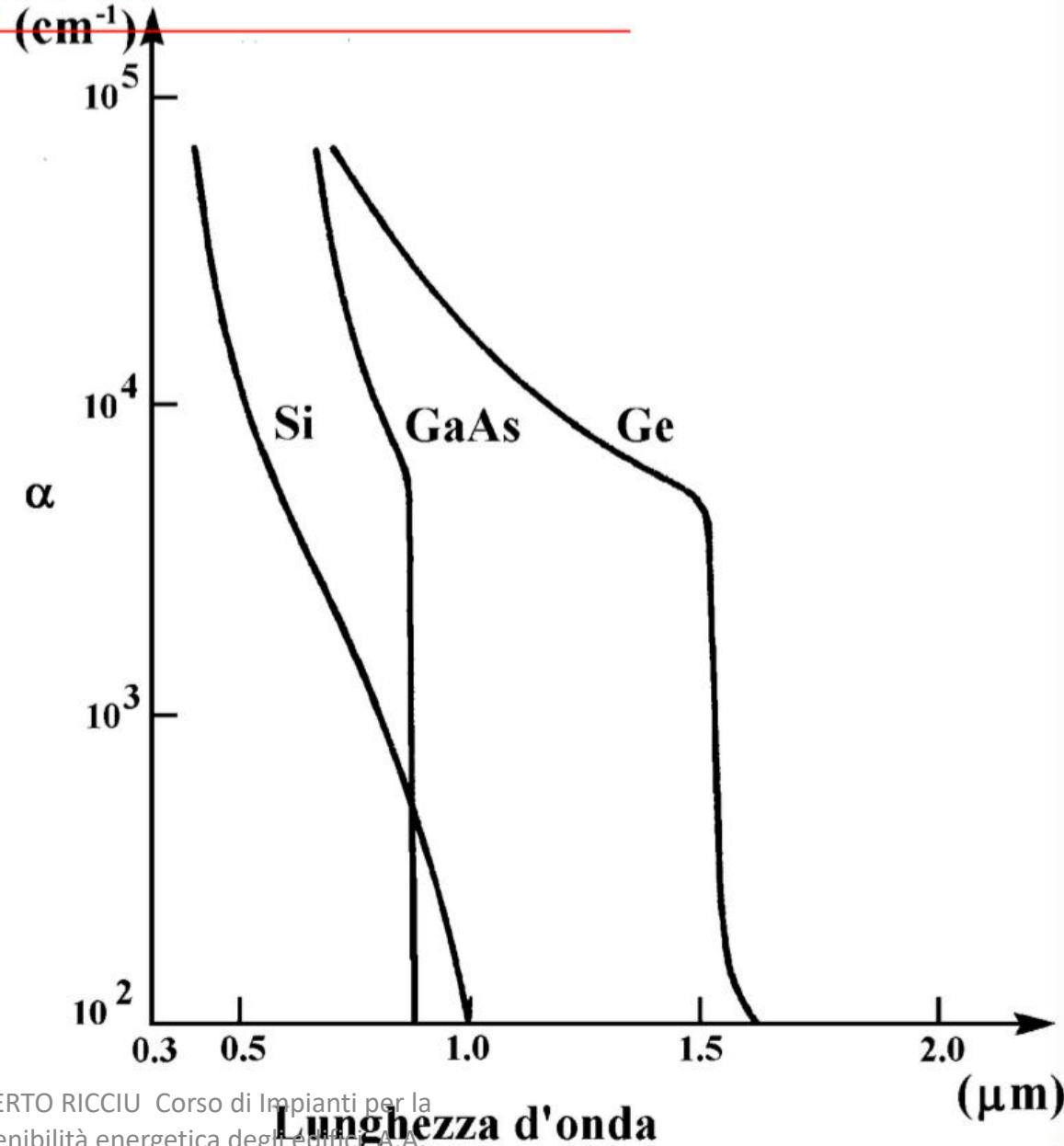
Gli impianti solari fotovoltaici

La conversione fotovoltaica

L'assorbimento dei fotoni

Ne risulta un rapido cambiamento del coefficiente di assorbimento α per :

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} = E_{\text{gap}}$$



Gli impianti solari fotovoltaici

La conversione fotovoltaica

L'assorbimento dei fotoni

Non tutti i fotoni con energia maggiore della E_{gap} del semiconduttore contribuiscono a generare energia elettrica nella cella:

La riflessione (40%)

E' possibile utilizzare degli opportuni rivestimenti antiriflettenti (SiO , SiO_2 , Ta_2O_5) che riducono fino al 3%.

L'attraversamento

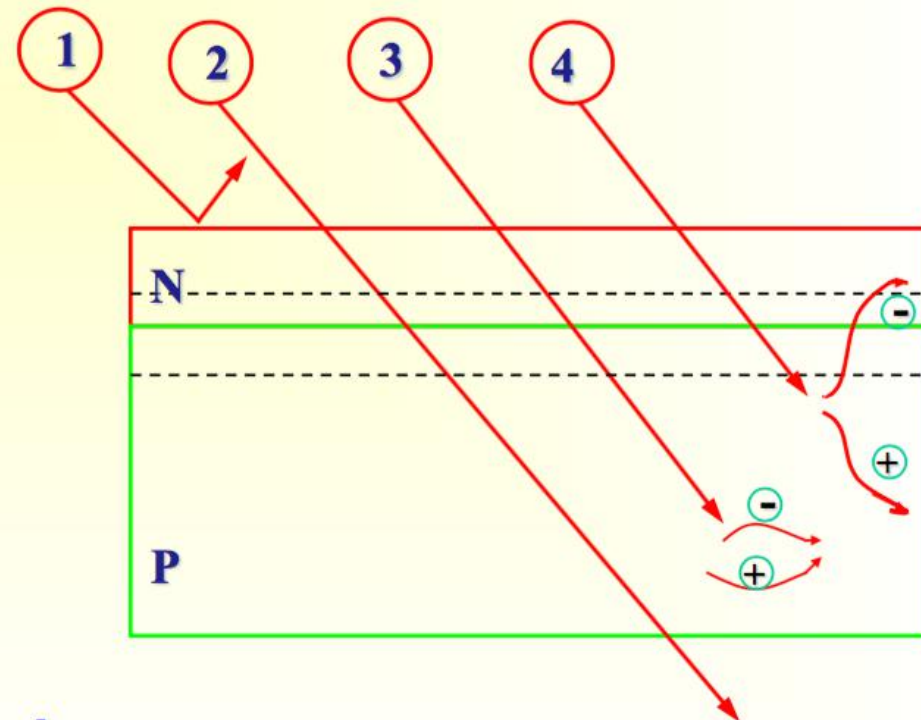
Dipende dallo spessore e da α : $\sim 300\mu$ per il Si, $<$ della decina di μ per il GaAs.

La ricombinazione

Il tempo perché ciò accada è detto "vita media" delle cariche, la distanza percorsa "lunghezza di diffusione".

L'effetto utile

Le cariche generate e separate dal campo elettrico daranno un contributo utile alla generazione di corrente elettrica.



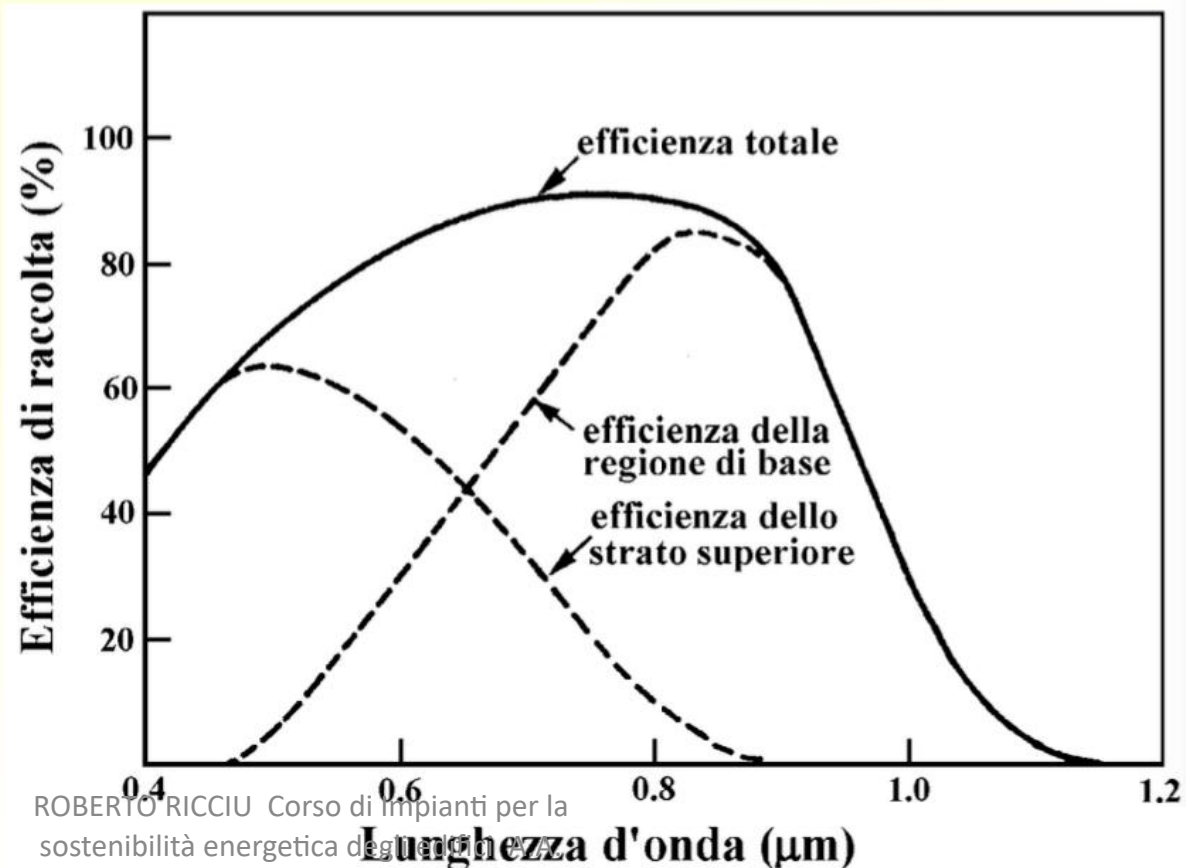
Gli impianti solari fotovoltaici

La conversione fotovoltaica

L'assorbimento dei fotoni

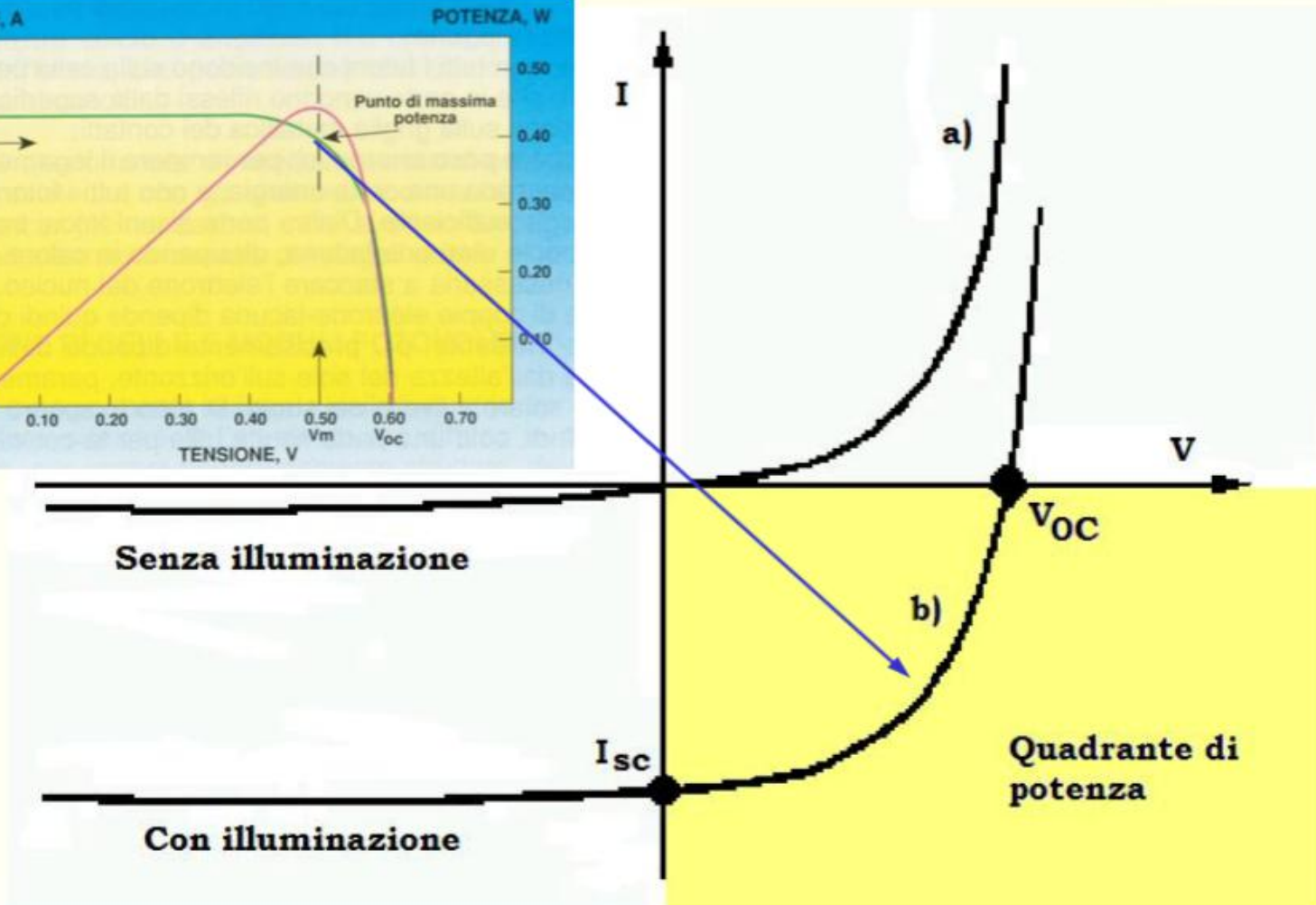
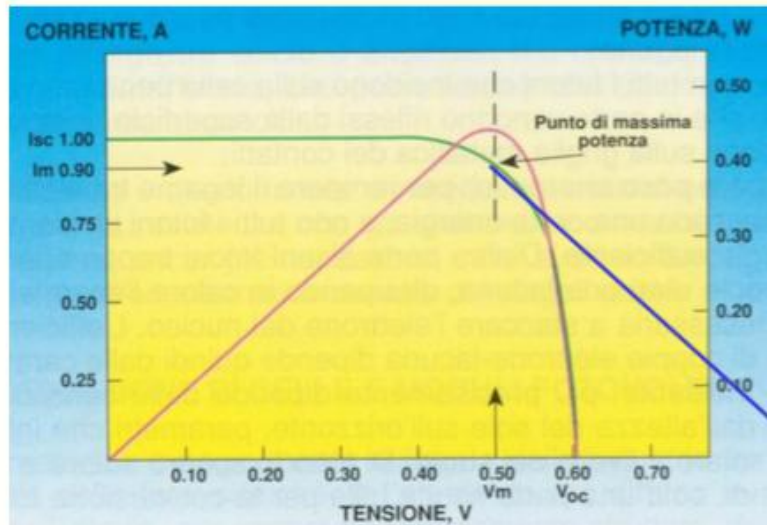
La giunzione deve essere posta ad una distanza dalla superficie tale da garantire il massimo assorbimento di N_0

Giunzione molto vicina alla superficie e con elevata lunghezza di diffusione nel materiale sottostante



Gli impianti solari fotovoltaici

La conversione fotovoltaica



In assenza di tensione c'è una corrente I_{sc} non nulla e negativa

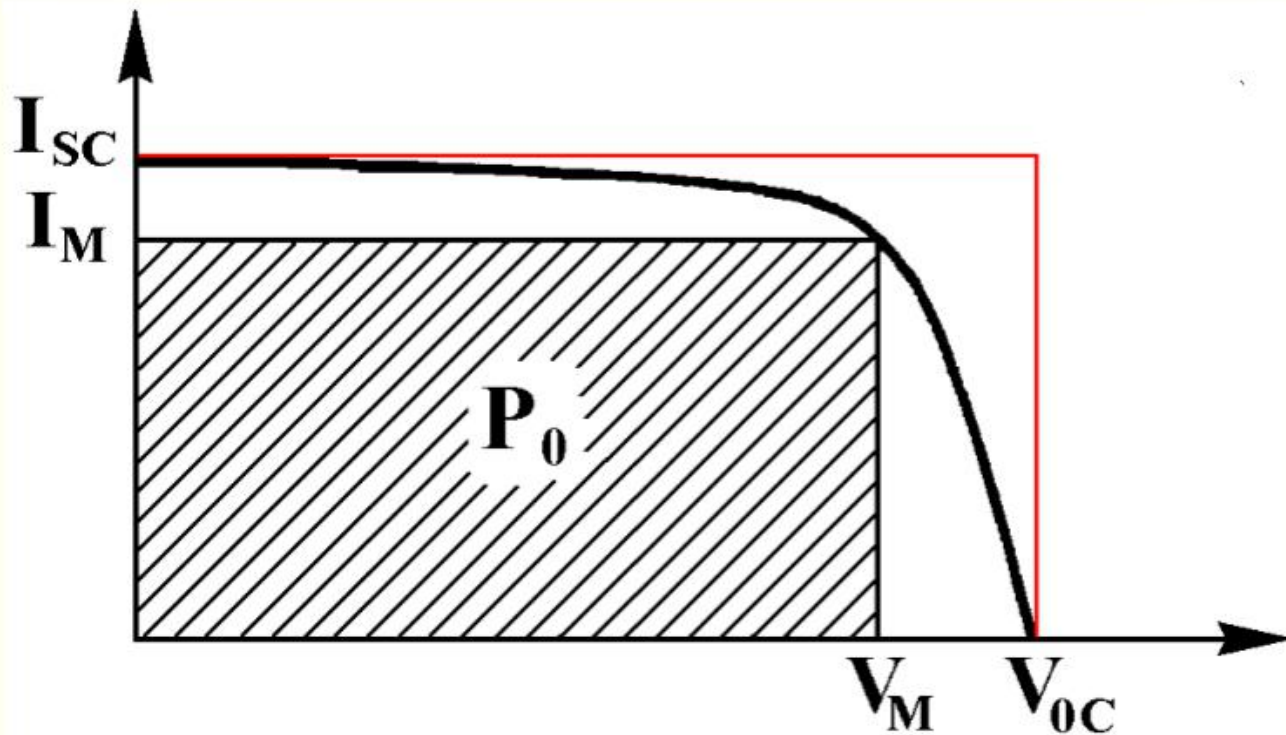
ROBERTO RICCIU Corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici A.A.

2020-21

Gli impianti solari fotovoltaici

La conversione fotovoltaica

Circuito equivalente di una cella solare

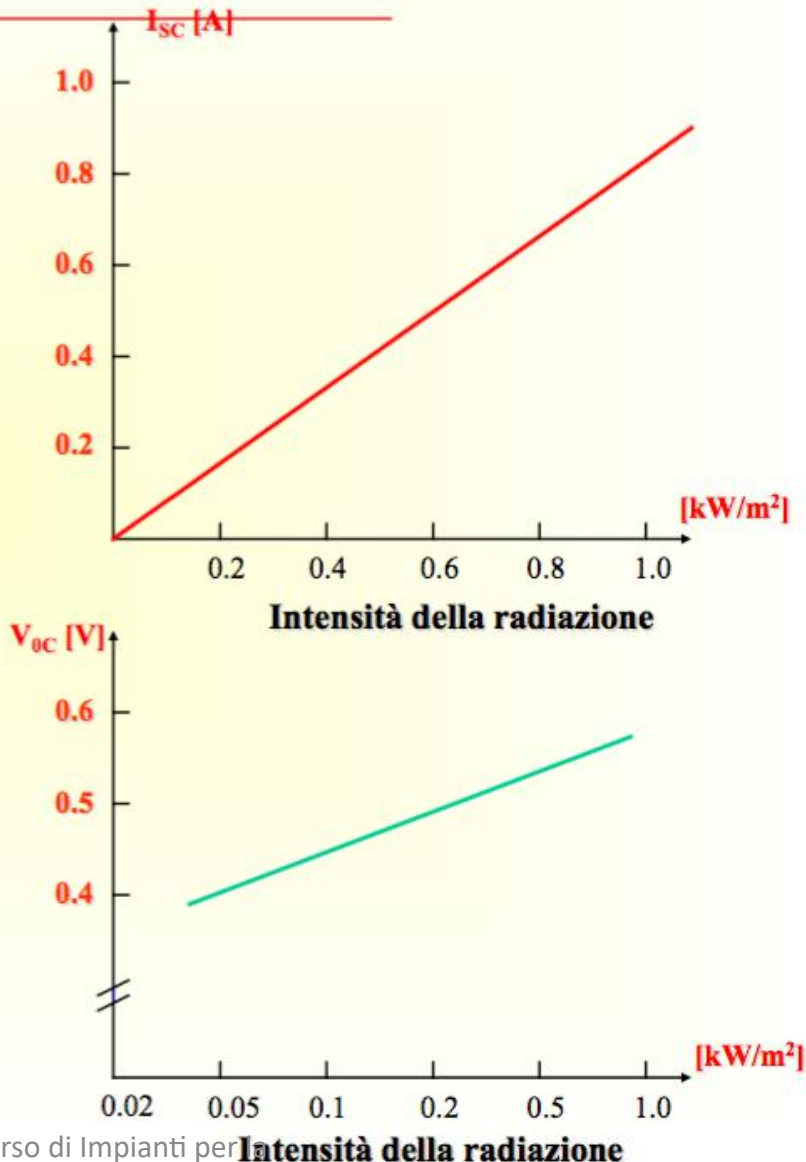
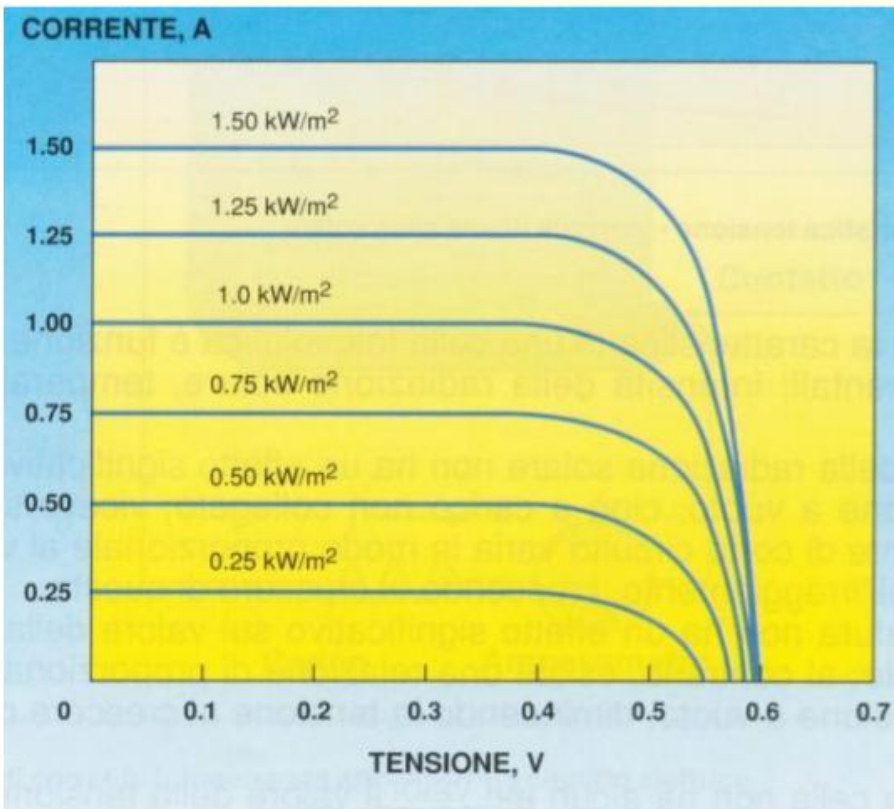


La corrente di corto circuito I_{SC} è la max corrente che può essere fornita dalla cella

La tensione V_{OC} è quella tensione che fa circolare nella cella una corrente pari a I_{SC}

Gli impianti solari fotovoltaici

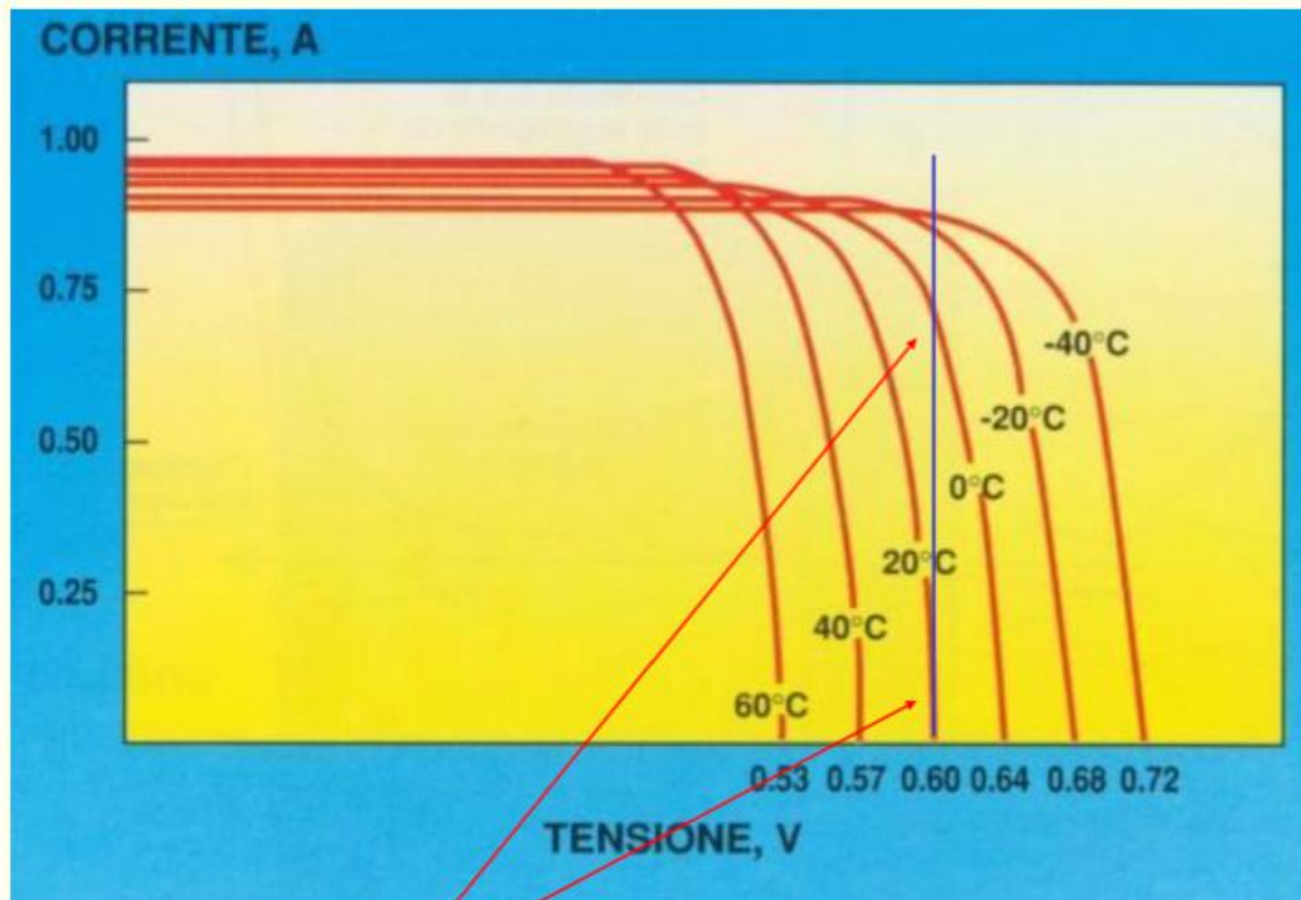
La conversione fotovoltaica



$$V = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc} - I}{I_0} + 1 \right)$$

Gli impianti solari fotovoltaici

La conversione fotovoltaica



Un aumento di temperatura della cella ne deteriora le prestazioni

ROBERTO RICCIU Corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici A.A.

2020-21

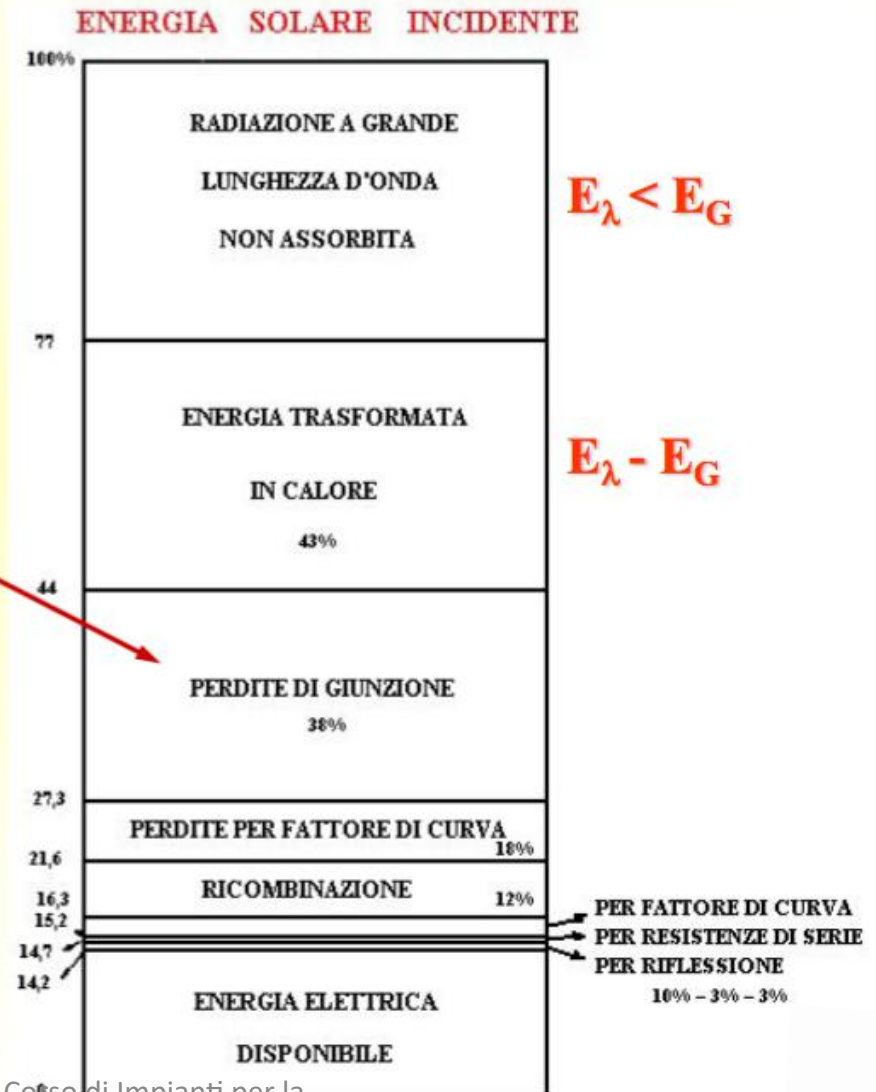
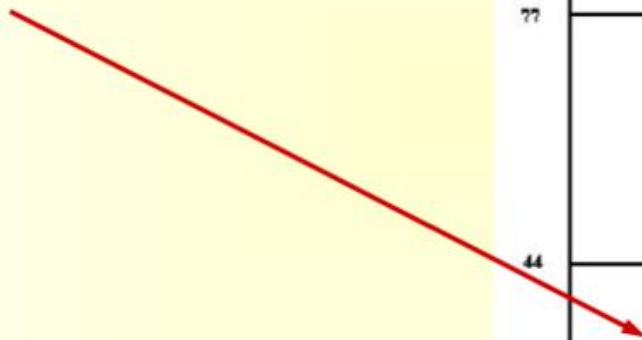
Gli impianti solari fotovoltaici

La conversione fotovoltaica

Efficienza di conversione

Può essere migliorata:

- Variando il drogaggio del semiconduttore



Gli impianti solari fotovoltaici

La conversione fotovoltaica

Efficienza di conversione

Può essere migliorata:

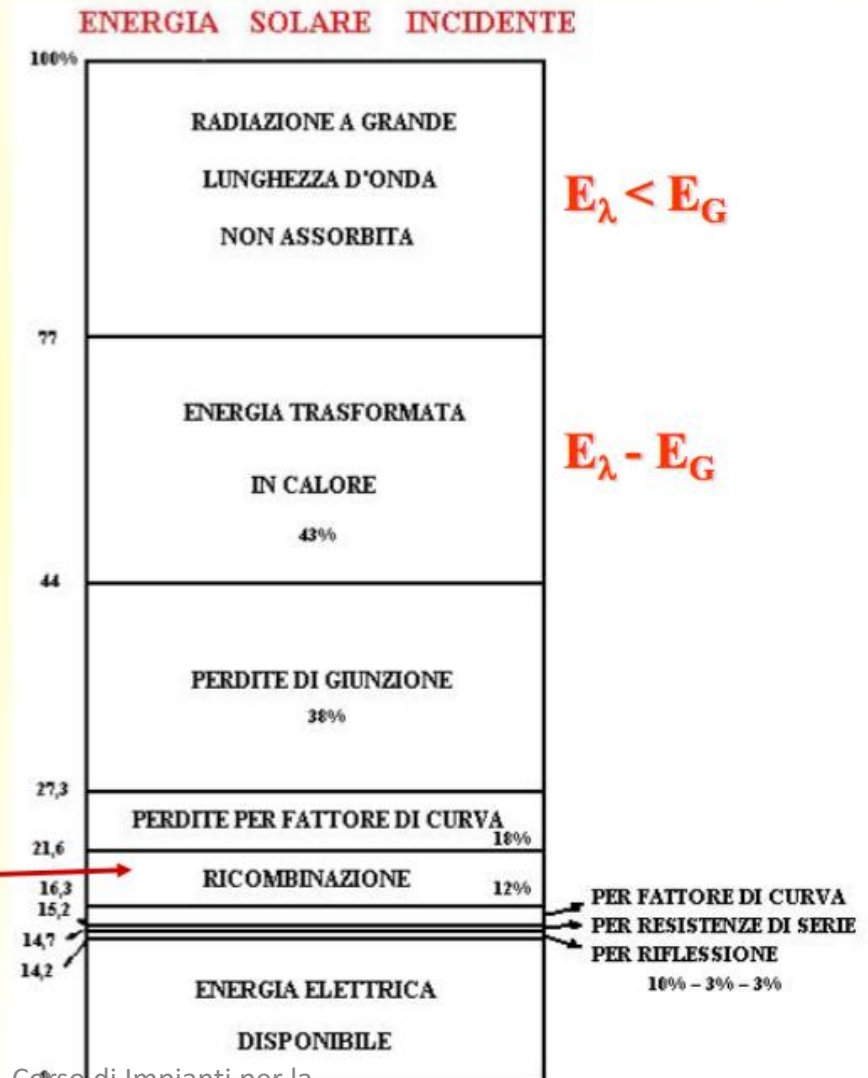
- Ottimizzando l'assorbimento dei fotoni di energia

$$\frac{E_{\text{assorbita}}}{E_{\text{incidente}}} = 1 - e^{-\alpha d}$$

La **profondità della giunzione** è scelta in modo da ottimizzare:

- l'assorbimento α
- la lunghezza di diffusione

Profondità $\sim 0.2 \mu\text{m}$



Gli impianti solari fotovoltaici

La conversione fotovoltaica

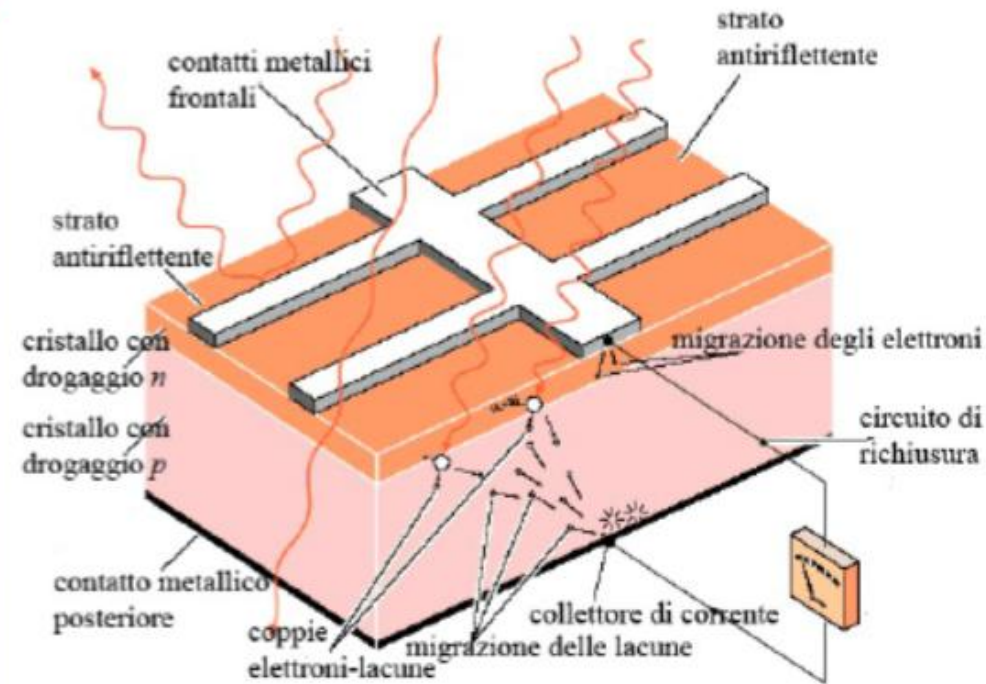
Efficienza di conversione

Può essere migliorata:

- **Riducendo il coefficiente di riflessione solare sulla faccia superiore**

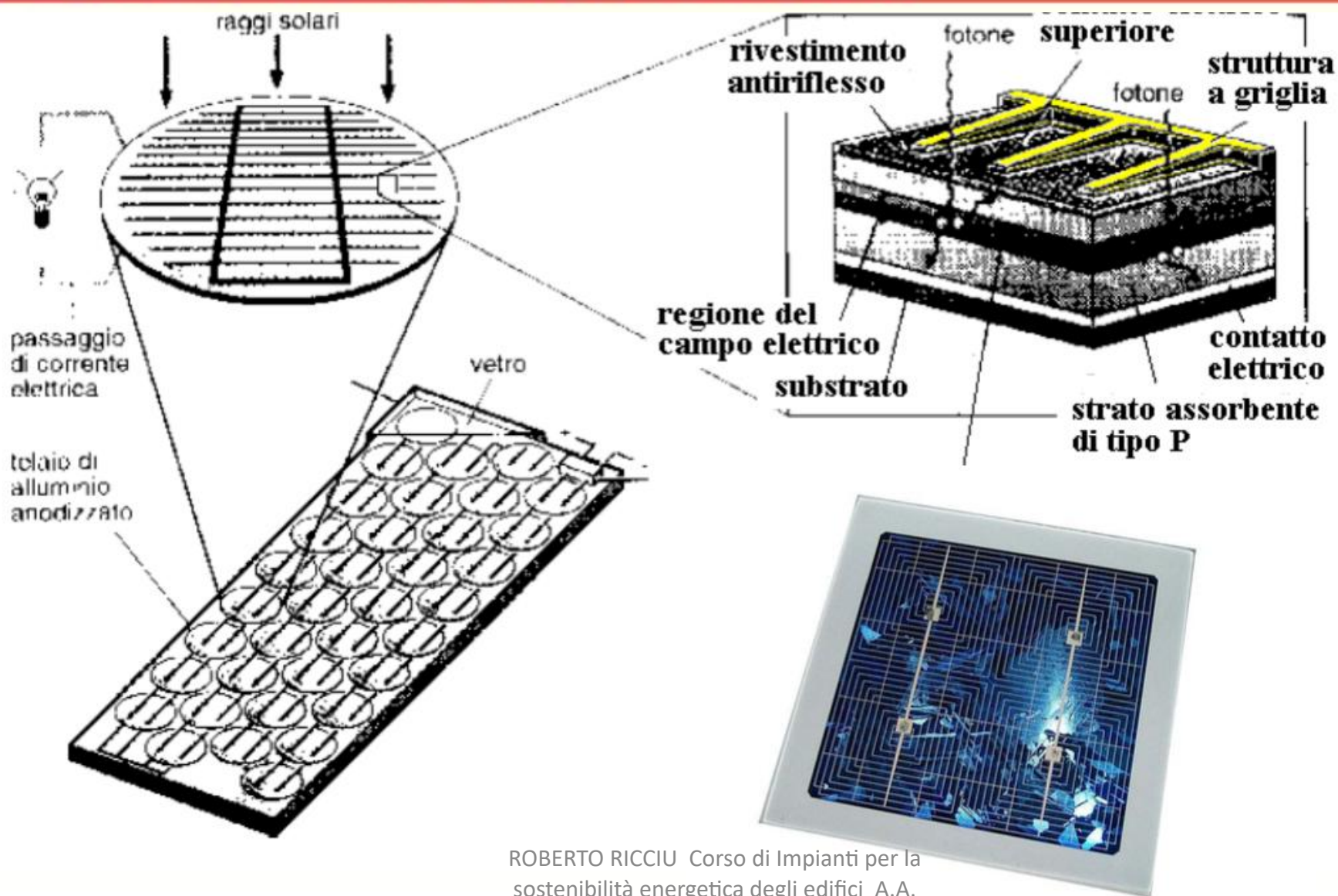
le cariche generate nella zona di svuotamento vengono raccolte all'esterno dai contatti metallici, posti sul fronte e sul retro della cella. Anche se durante la fabbricazione viene effettuato un processo di lega tra il silicio e l'alluminio dei contatti, resta una certa resistenza all'interfaccia, che provoca una dissipazione che riduce la potenza trasferita al carico.

Nel caso di celle al silicio policristallino, l'efficienza è ulteriormente diminuita a causa della resistenza che gli elettroni incontrano ai confini tra un grano e l'altro e, ancor più nel caso di celle al silicio amorfo, per la resistenza dovuta all'orientamento casuale dei singoli atomi.



Gli impianti solari fotovoltaici

La conversione fotovoltaica



ROBERTO RICCIU Corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici A.A.

2020-21

Gli impianti solari fotovoltaici

I materiali tradizionali

Il Silicio ampiamente disponibile in natura non è puro e quindi non utilizzabile direttamente. Mediante processi di lavorazione è possibile, ottenere varie tipologie di Silicio suddivise in;

- **Silicio di grado elettronico:** una parte di impurità per ogni 10^7 e oltre parti di Silicio;
- **Silicio di grado solare:** una parte di impurità per ogni 10^4 e 10^7 parti di Silicio;
- **Silicio metallurgico:** una parte di impurità per ogni 10^4 parti di Silicio.

Per la realizzazione di celle fotovoltaiche necessario almeno del silicio di grado solare. Ciò consente all'industria fotovoltaica la possibilità di sfruttare sia il silicio di grado elettronico sia quello di grado solare.

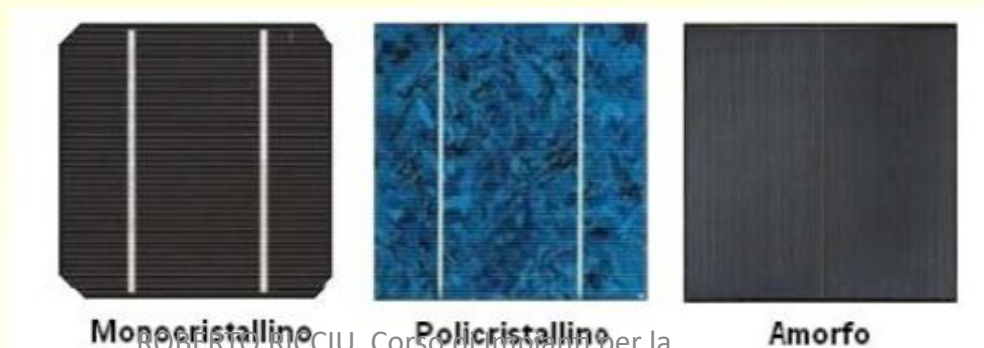
Quest'ultimo risulta molto più economico poiché è possibile ricavarlo dagli scarti di produzione dell'industria elettronica che è costretta ad utilizzare solamente silicio di grado elettronico.

Gli impianti solari fotovoltaici

I materiali tradizionali

Il reticolo, cristallino non è sempre regolare ma esistono varie forme (allotropia):

- **Amorfa:** gli atomi sono orientati in modo casuale come nei fluidi. La struttura degli atomi risulta non cristallina e alcuni atomi non possiedono tutti e quattro i legami con altri atomi;
- **Monocristallina:** gli atomi sono orientati e legati nello stesso modo realizzando una struttura cristallina regolare;
- **Policristallina:** insieme di piccoli cristalli monocristallini uniti assieme in maniera irregolare (non è una forma allotropica del materiale ma una via di mezzo tra le due precedenti).



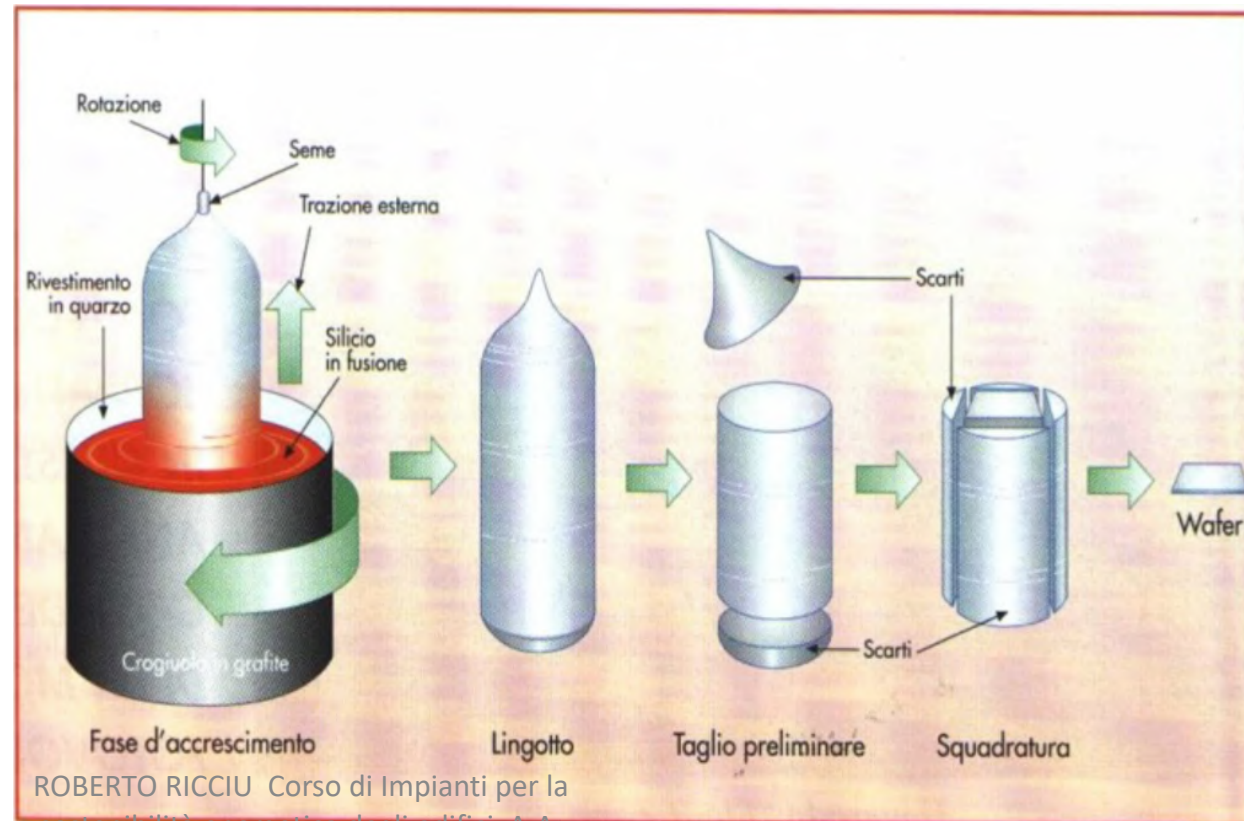
Gli impianti solari fotovoltaici

I materiali tradizionali

Silicio Monocristallino

La cristallizzazione di lingotti di silicio monocristallino viene effettuata mediante il **processo Czochralski**. Nella prima fase del processo, il silicio a elevata purezza viene fuso a 1414°C in un crogiuolo di grafite rivestito in quarzo, nella seconda parte viene immerso un seme di silicio cristallino in lenta rotazione, opportunamente raffreddato.

La barra del cristallo viene lentamente tirata verso l'alto e contemporaneamente fatta girare. Controllando i gradienti termici, la velocità di estrazione e quella di rotazione, è possibile estrarre dalla colata un lingotto di silicio cilindrico, di dimensioni tra 13 e 20 cm di diametro e 200 cm di lunghezza, costituito da un solo cristallo. Normalmente questo processo viene realizzato in un ambiente inerte.



ROBERTO RICCIU Corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici A.A.

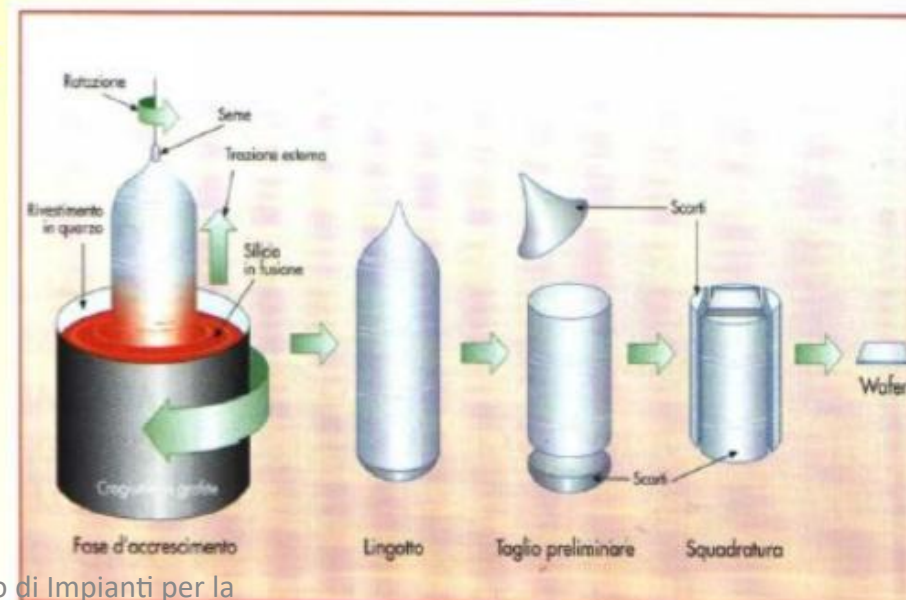
Gli impianti solari fotovoltaici

I materiali tradizionali

Nel processo è importante il controllo rigoroso della temperatura del materiale fuso, dell'atmosfera nella camera, della velocità di estrazione e l'assenza di vibrazioni durante l'estrazione. Il rispetto dei precedenti fattori permette la produzione di fusi perfettamente cilindrici di alta purezza (grado elettronico).

E' possibile realizzare fusi di Silicio drogato inserendo atomi del drogante opportuno nel Silicio fuso. Le fasi successive riguardano il taglio del lingotto mediante l'utilizzo di un disco diamantato. L'obbiettivo è ottenere dischi con spessori millimetrici denominati wafer.

Infine, la superficie del wafer viene ricoperta da uno strato di ossido per proteggerla dalla contaminazione da parte di impurità esterne.



Gli impianti solari fotovoltaici

I materiali tradizionali

Silicio Policristallino e metodo Casting

Il policristallino è un materiale costituito da vari cristalli di Silicio monocristallino orientati in modo casuale. Si realizza riciclando componenti elettronici scartati rifondendoli assieme per ottenere una composizione compatta.

Le prime fasi del processo consistono nella minuta frammentazione del materiale seguito da un'operazione di decapaggio per una prima purificazione da impurità superficiali. Il materiale viene quindi fuso e colato nelle forme (casting) in cui avviene la successiva ricristallizzazione.



ROBERTO RICCIU Corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici A.A.

Gli impianti solari fotovoltaici

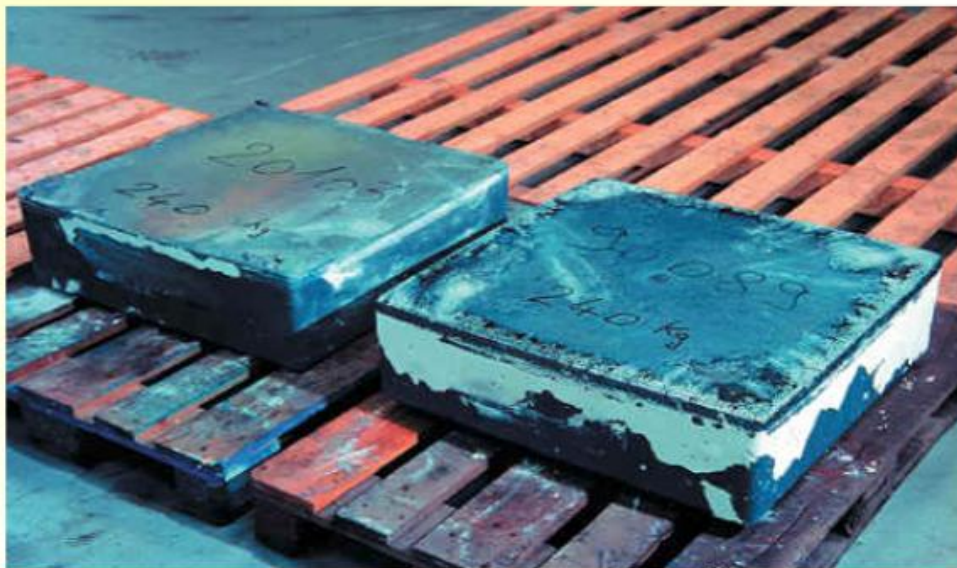
I materiali tradizionali

Silicio Policristallino e metodo Casting

Le operazioni di fusione colaggio e cristallizzazione sono particolarmente critiche. Il problema, tipico di tutta la tecnologia di produzione dei semiconduttori, è quello della necessità di ridurre al minimo il tasso di impurezze presenti nel materiale al fine di ottenere la migliore efficienza della conversione fotovoltaica. E' questo il motivo per cui, a tutt'oggi, i processi che consentono di arrivare a blocchi di policristallo non permettono la fusione di masse di silicio superiori a 100 kg al giorno.

Dopo la cristallizzazione si procede alla squadratura del blocco così ottenuto per togliere le asperità meccaniche, e per eliminare le impurità che i processi precedenti hanno fatto addensare alla superficie del materiale. Dalla massa si ottengono quindi vari lingotti, che vengono successivamente affettati per la realizzazione dei cosiddetti "wafers" o fette.

L'operazione di taglio è fra quelle che provocano la maggior perdita di materiale.



Gli impianti solari fotovoltaici

I materiali tradizionali

Silicio amorfo

Nel caso del silicio amorfo è improprio parlare di celle fotovoltaiche: il silicio infatti viene depositato uniformemente e in piccolissime quantità su superfici plastiche o vetrate, formando un unico film sottile o *thin film* dello spessore di qualche millesimo di millimetro.

I pannelli in silicio amorfo hanno una colorazione omogenea, di solito nera o comunque scura, e hanno particolari doti di flessibilità e leggerezza, con spessori complessivi del modulo, telaio compreso, di pochi millimetri.

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

I valori di efficienza sono attualmente soltanto del 5-8% e rimangono da risolvere problemi legati all'instabilità delle prestazioni nel tempo, (calo di efficienza, circa del 20%).

Il costo dei moduli in silicio amorfo, per Watt installato, è inferiore anche del 30-40% rispetto alle tecnologie in silicio cristallino.



Gli impianti solari fotovoltaici

Nuove tecnologie – moduli a film sottile

I moduli a film sottile o CIS

Sono composti da pellicole di una lega compatta di rame, indio e diselenide. Le celle, ricoperte da un vetro trasparente temprato che garantisce maggior potenza, assicura resistenza all'impatto e protezione contro grandine, neve e ghiaccio.

Offrono prestazioni eccezionali anche con poca luce e hanno una minima tolleranza alle alte temperature. La particolare disposizione delle celle lunghe e molto sottili dei moduli CIS li rende più vantaggiosi dei moduli in silicio cristallino in situazioni di ombreggiamento parziale (nuvole, fogliame, guano, ecc).

Contrariamente ai moduli in silicio, i moduli CIS sono privi di saldature. La corrente viene “prelevata” attraverso 2 o 3 nastri conduttori e “convogliata” direttamente nella scatola di collegamento.

Già durante il processo di fabbricazione le celle vengono collegate tra di loro in un blocco monolitico.



Gli impianti solari fotovoltaici

Nuove tecnologie – moduli a film sottile

I moduli a film sottile o CIS

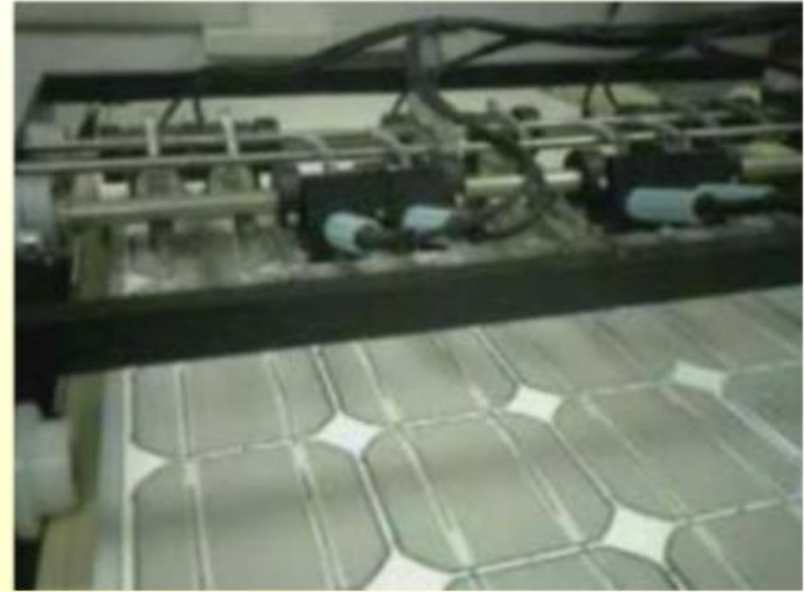
I moduli fotovoltaici CIS di ultima generazione hanno un'efficienza che può arrivare al 12-13%, paragonabile a quella del silicio policristallino. Grazie alla particolare configurazione del materiale, la tecnologia *Thin Film* consente di ottenere pannelli CIS flessibili.

Per quanto riguarda le prestazioni nel tempo, il decremento di produzione negli anni di un modulo CIS è analogo a quello di un modulo cristallino, e cioè dopo 20 anni produce l'80% della potenza nominale.



Gli impianti solari fotovoltaici

La realizzazione del pannello

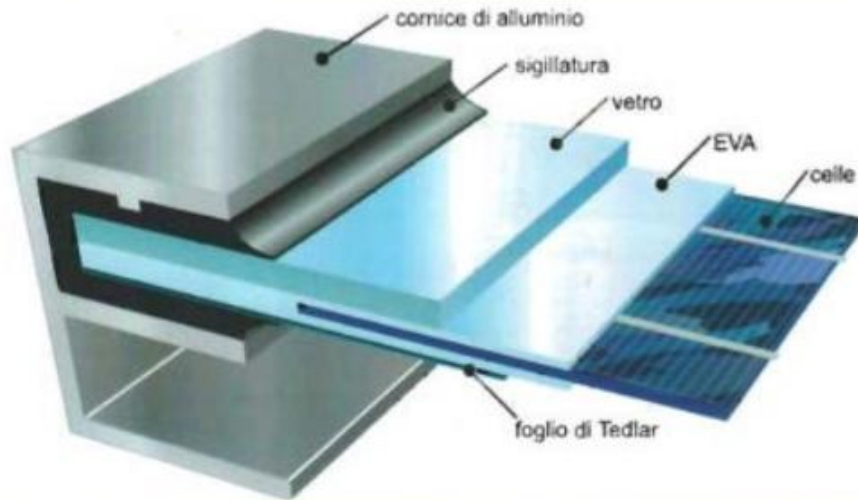


Occorrono adeguati terminali di collegamento sui contatti anteriori e posteriori della cella.

Questi terminali in rame sono in forma di nastro e si chiamano Ribbon. La saldatura fra più celle (Tabbing) può essere manuale o automatica.

Gli impianti solari fotovoltaici

La realizzazione del pannello



- Vetro (i moduli costruiti in Italia abitualmente usano vetro da 4mm di spessore)
- Etilene vinil acetato - EVA
- Celle mono o poli cristalline
- Backsheet

Il vetro viene usato come base su cui viene steso un foglio di Eva. Sopra all'Eva vengono posizionate le celle rivolte con il lato fotosensibile verso il basso, viene steso un altro foglio di EVA e quindi viene steso un foglio di materiale isolante plastico (PET o similare) oppure un'altra lastra di vetro.

Il vetro è a basso contenuto di ferro per garantire una maggiore trasparenza (circa il 91,5%) ai raggi solari ed è temprato.

Il sandwich così realizzato viene inviato al laminatore, una macchina nel quale il sandwich entra e viene creato il vuoto per circa 5 minuti quindi a queste condizioni la piastra del laminatore si riscalda fino a 145°C circa per 10 minuti in modo da favorire la polimerizzazione dell'EVA.

Se la laminazione è stata fatta correttamente anche senza aggiungere altro il laminato potrebbe resistere alle intemperie per almeno 25/30 anni.

Gli impianti solari fotovoltaici

Altri tipi di celle solari

A microsferi

Silicio microsferico, in cui si impiega silicio policristallino ridotto in sfere del diametro di circa 0,75 mm ingabbiate in un substrato di alluminio

Struttura flessibile: non è la cella (sfera) a flettersi, ma la griglia a nido d'ape su cui è disposta



Gli impianti solari fotovoltaici

Pannelli a film sottile

- ✓ **Maggiori prestazioni in reali condizioni di luce esterna bassa e diffusa (+12-15%) dei pannelli normali messi nella stessa posizione.**
- ✓ **perfettamente integrabili in qualunque struttura e su qualunque linea di tetto**
- ✓ **Il Peso per metro quadro di prodotto installato è di circa 9 kg , quindi meno della metà rispetto ad un pannello tradizionale**
- ✓ **La bassa riflettanza dei moduli a film sottile fa si che essi possano essere installati anche in vicinanze di aeroporti e zone sensibili.**
- ✓ **Vengono appoggiati direttamente su una superficie metallica e non hanno bisogno di ventilazione**
- ✓ **La presenza di un maggior numero di diodi fa si che in caso di danneggiamento di una cella le altre celle continuano a produrre.**
- ✓ **Garanzia rendimento dell'80% per 20 anni.**
- ✓ **Il coefficiente termico si riduce dello 0,25%/K rispetto ai mono e poli cristallini che si riducono dello 0,5%/K.**



Gli impianti solari fotovoltaici

La conversione fotovoltaica

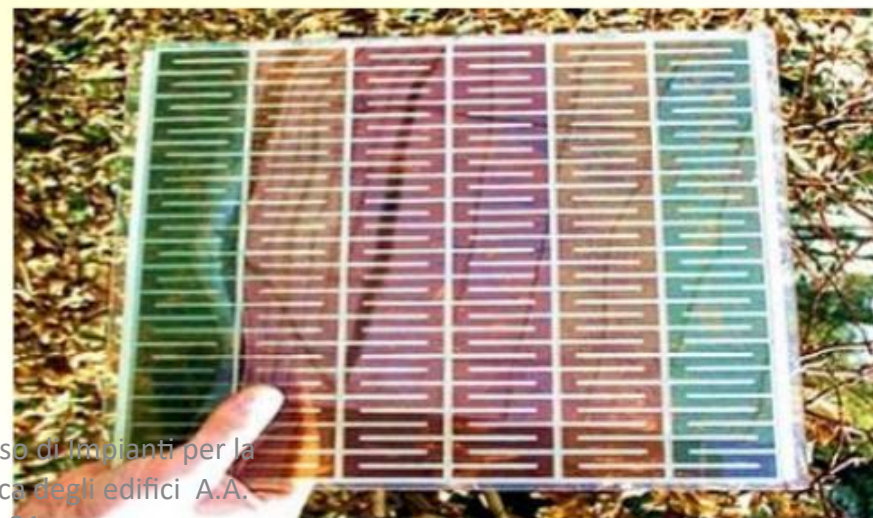


Il costo elevato dei wafer di silicio (che costituisce il 40-50% del costo di un pannello solare), ha portato l'industria a guardare materiali meno costosi e magari più efficienti. I materiali più duraturi ed efficienti possono essere il silicio amorfo, materiali policristallini come il telloruro di cadmio (CdTe), il gallio o la diselenide (CSI o CIGS).

Questi ultimi tre si prestano facilmente ad un'applicazione a più strati su vetro o materiali rivestiti in acciaio o lamiera. Le giunzioni dei semiconduttori sono formati in in diversi modi, sia tramite silicio amorfo o solfuro di cadmio per i CdTe e CIGS. Un trasparente strato di ossido (di stagno ad esempio) costituisce la parte a contatto con le celle.

Efficienza $\approx 17,7\%$ (AIST) tecnologia che va sotto la sigla di "ASTL" (alkali-silicate thin layer) che utilizza uno strato sottile di vetro composto da sali alcalini silicati.

Uno strato di vetro silicato viene depositato su un substrato di ceramica ed utilizzato per controllare, regolare e diffondere il livello di luce assorbita.



Gli impianti solari fotovoltaici

Fotovoltaico al mirtillo



Uno strato di pigmento fotosensibile ottenuto dai mirtillo, l'antocianina, confinato da due strati di vetro o plastica trasparente e flessibile.

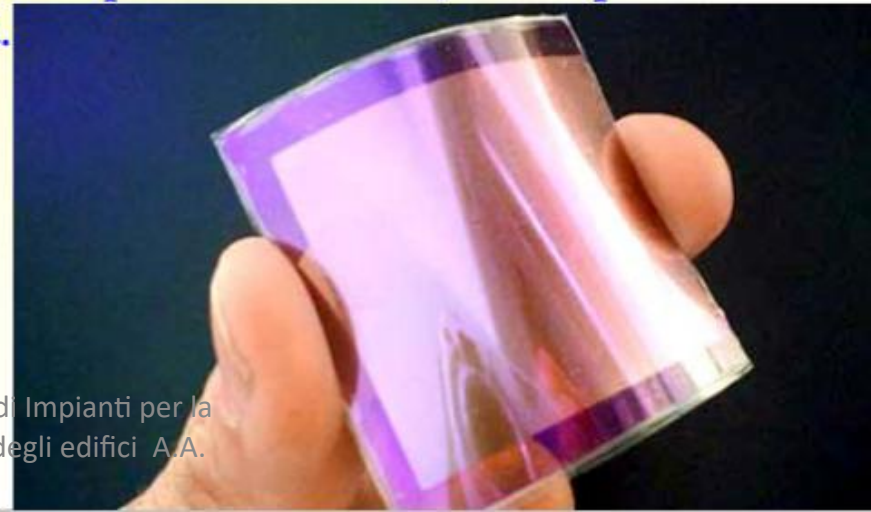
Il pigmento viene messo in intimo contatto con un elettrodo composto da nanoparticelle di ossido di titanio. L'uso delle nanoparticelle serve per aumentare la superficie di contatto atte a raccogliere la carica elettrica.

Esteticamente hanno la forma di fogli flessibili (dunque arrotolabili e facilmente trasportabili) o lastre di vetro semi trasparenti e in futuro potranno anche essere stesi sopra i palazzi, funzionare come copertura per le tende della protezione civile, essere parte delle finestre di un edificio o dei cristalli di una vettura.

Costo dei pannelli -50%.

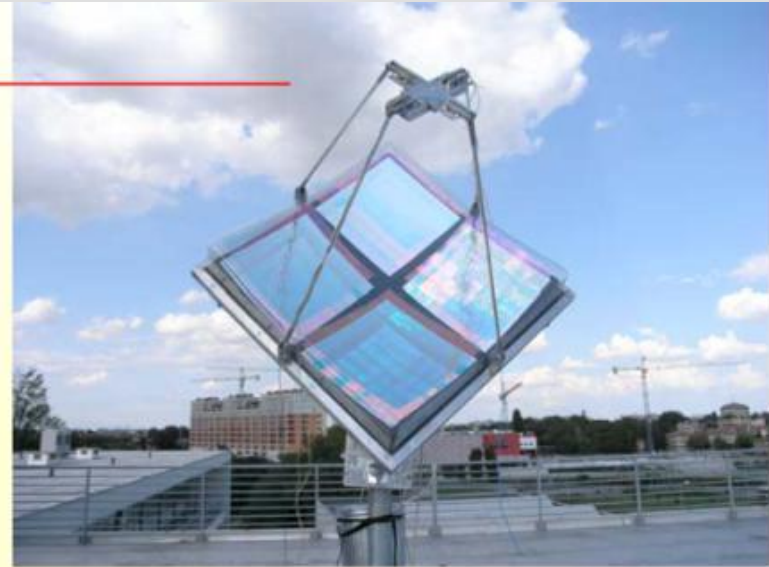
Efficienza dal 4% al 10%.

L'esposizione all'aria deteriora il pigmento, la sigillatura della cella è fondamentale.



Gli impianti solari fotovoltaici

Fotovoltaico a concentrazione



Costi inferiori, per unità di potenza, rispetto al fotovoltaico piano e grandi potenzialità di incrementare ulteriormente il rendimento.

Maggiore energia prodotta a parità di potenza rispetto ai pannelli piani + 40% (dovuta all'inseguimento solare)...tendenza + 65%.

Ridotto uso di silicio e quindi insensibilità alla rigidità dell'offerta di questo materiale

Facilità di produzione di massa (stampi, motori, supporti, vetreria sono industrie comuni e diffuse)

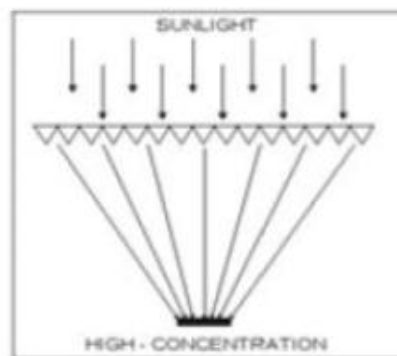
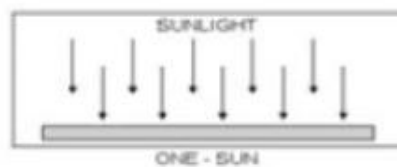
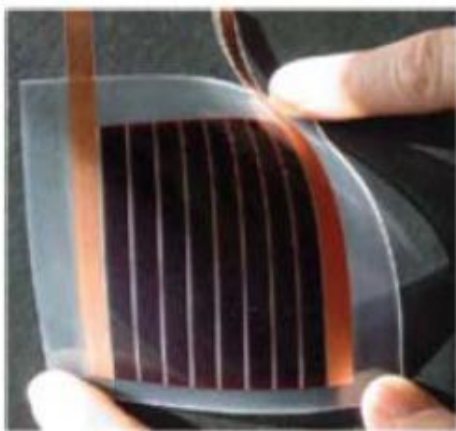
Maggiore facilità di installazione

Facilità nella modifica delle dimensioni e, quindi, della potenza

Gli impianti solari fotovoltaici

Thin film

- Amorphous Si, cadmium telluride, copper indium diselenide and many new others!
- Efficiency up to 11 %
- Can be deposited on any surface
- Colour depends on materials
- Can be clear films mounted on windows or roof tiles



Solid concentrator

- Fresnell lenses concentrator with tracking
- 25 kWp unit/850W/m²
- 26.6% efficiency triple-junctionsolar cells
- X 250 concentration
- DPGS/Stand alone/pumping/ desalinization/H2 production

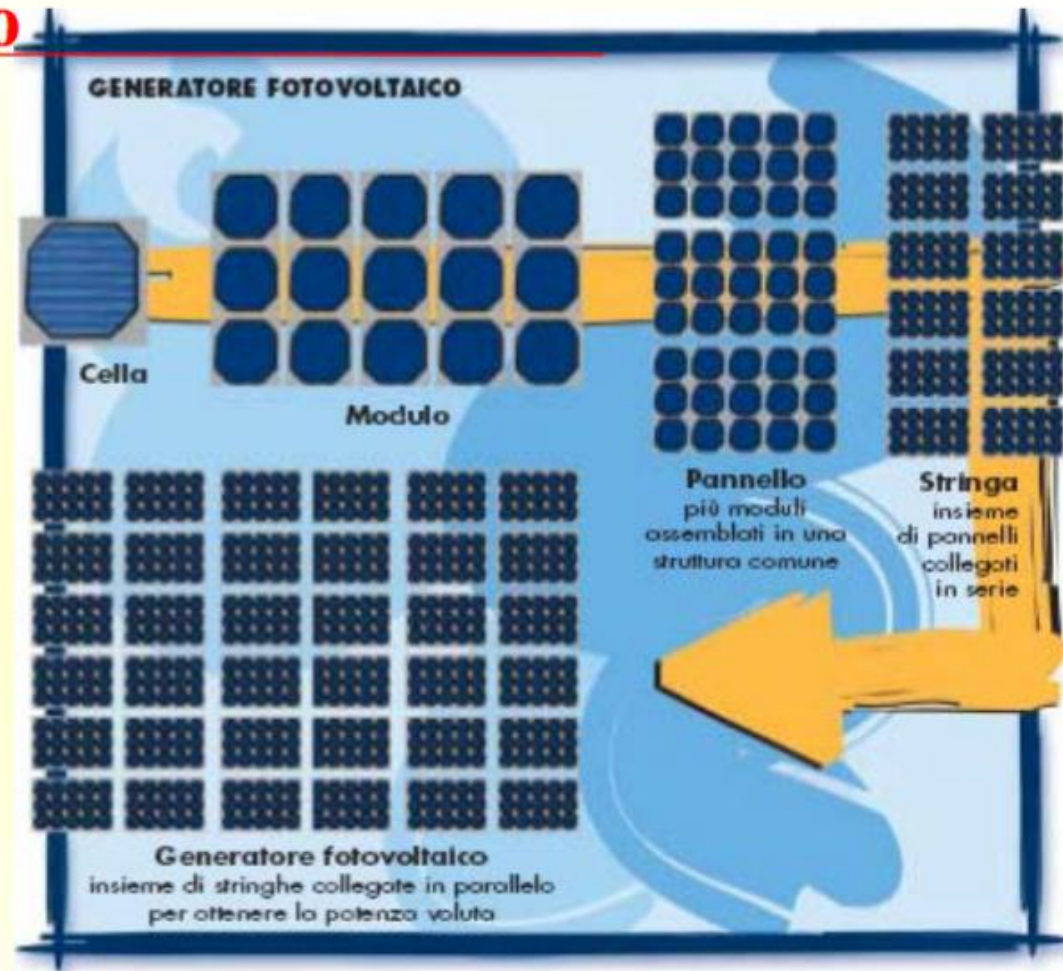
Gli impianti solari fotovoltaici

Il generatore fotovoltaico

I **moduli** o **pannelli** sono costituiti da un insieme di **celle**.

*Più diffusi in commercio: 36 celle di silicio mono e policristallino disposte su 4 file parallele collegate in serie.
Superficie $\approx 0,5 \div 1 \text{ m}^2$*

Il **pannello** presenta una struttura rigida ancorabile al suolo o ad un edificio



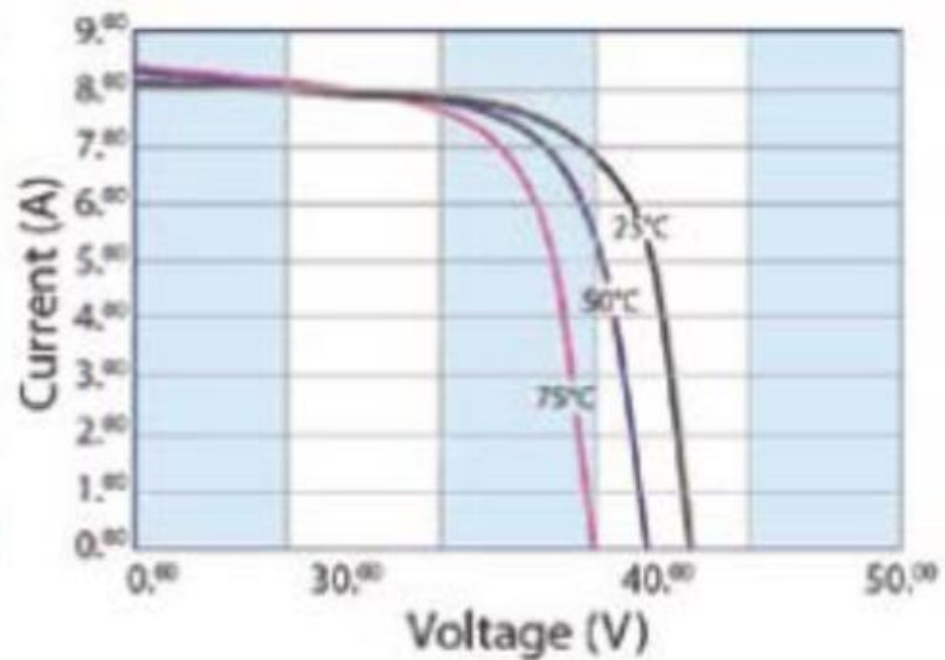
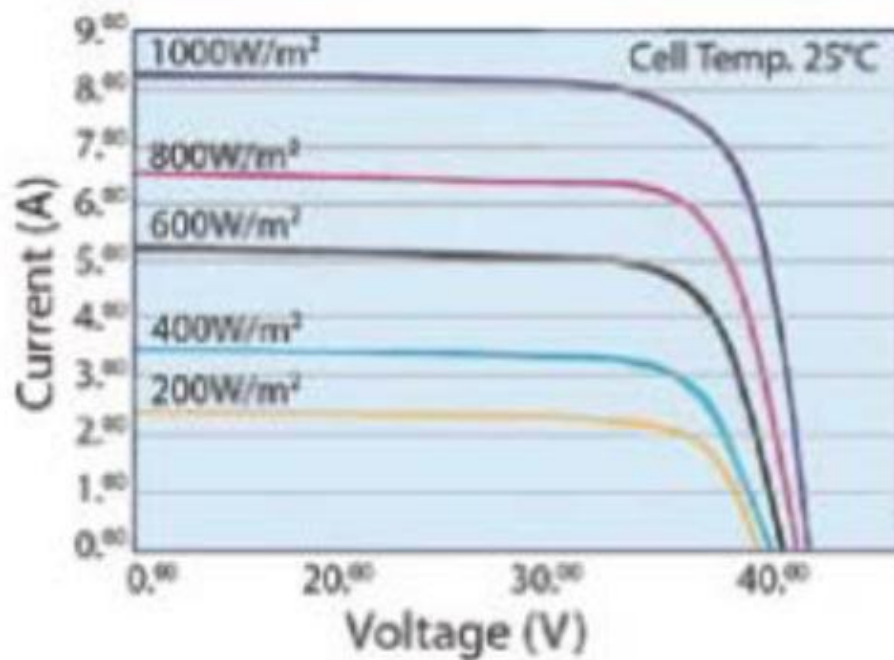
Un insieme di pannelli, collegati elettricamente in serie costituisce una stringa

Più stringhe, collegate generalmente in parallelo, per fornire la potenza richiesta, costituiscono il **generatore fotovoltaico**

Gli impianti solari fotovoltaici

Esempio di dati forniti dal costruttore

CURVE CURRENT - VOLTAGE



Gli impianti solari fotovoltaici

Esempio di dati forniti dal costruttore

ELECTRICAL FEATURES					
					STC
Type	Model	xxx Rated Power [W]			
FVG 72-156	FVG xxxM-MC*	285	290	295	300
Module Efficiency	η_m (%)	14.68	14.94	15.20	15.46
Cell Efficiency	η_c (%)	16.55	16.90	17.20	17.50
Power Peak	Pm (W)	285	290	295	300
Maximum Power Voltage	Vm (V)	36.50	36.60	36.70	36.80
Maximum Power Current	Im (A)	7.85	7.95	8.05	8.17
Open Circuit Voltage	Voc (V)	44.90	45.00	45.10	45.20
Short Circuit Current	Isc (A)	8.30	8.38	8.48	8.58
Maximum System Voltage	(VDC)	1,000			
Power Output Tolerance	(W)	0 / + 5			
Max-Series Fuse	(A)	20			
Operating/Storage Temp.	(°C)	- 40 ~ + 85			
Dielectric Insulation Voltage	(VDC)	3,000 max			
Code	MFM	50313	50314	50315	50316

STC: Irradiance 1,000 W/m², module temperature 25 °C, AM=1.5
Power measurement tolerance: ± 3%

Gli impianti solari fotovoltaici

Esempio di dati forniti dal costruttore

					NOCT
Typical Power at NOCT	Pm (W)	208	212	215	218
Maximum Power Voltage	Vm (V)	32.60	32.70	32.75	32.79
Maximum Power Current	Im (A)	6.39	6.50	6.60	6.66
Open Circuit Voltage	Voc (V)	40.80	40.90	40.96	40.99
Short Circuit Current	Isc (A)	6.75	6.80	6.83	6.87
NOCT: Irradiance 800 W/m ² , ambient temperature 20 °C, wind speed 1 m/s Power measurement tolerance: ± 3%					

TEMPERATURE CHARACTERISTICS - STC

NOCT - Nominal Operating Cell Temperature	(°C)	45 ± 2
Pm Temperature Coefficient	(%/°C)	- 0.45
Voc Temperature Coefficient	(%/°C)	- 0.34
Isc Temperature Coefficient	(%/°C)	0.05

Gli impianti solari fotovoltaici

Esempio di dati forniti dal costruttore

MECHANICAL FEATURES		
Cell Size	(mm)	156 x 156
Number of cells		72 cells - monocrystalline silicon
Module Dimensions	(mm)	1,960 x 990 x 45
Module Weight	(kg)	27
Front Glass		4 mm tempered glass
Frame		anodized aluminium alloy
Junction box		6 by-pass diodes
Connectors		IP67 type MC3 or MC4
Output Cables	(mm)	900

Im commercio: pannelli policristallini e monocristallini, con potenze di picco tra 230 e 245 Wp:

- altezza di 160 – 170 cm
- larghezza di 90 – 100 cm
- spessore di 4 – 5 cm

Gli impianti solari fotovoltaici

Verifica dell'idoneità del sito

Dovrebbero partecipare:

- **il cliente**
- **il progettista (per nuove abitazioni)**
- **il tecnico incaricato**

Le condizioni ambientali, tecniche e logistiche del sito hanno impatto sostanziale sulle scelte tecniche ed economiche

Quasi sempre non si conosce la potenza fotovoltaica da installare !!!

Può essere stimata grossolanamente per un'utenza **parallelabile in funzione delle **disponibilità economiche** del cliente e delle **dimensioni dell'area utilizzabile**.**

Gli impianti solari fotovoltaici

Verifica dell'idoneità del sito

Il sopralluogo ha lo scopo di valutare:

1) Le modalità tecniche di installazione dei moduli fotovoltaici

- a) *Posizione dei moduli***
- b) *Orientamento della superficie***
- c) *Integrazione dei moduli nell'edificio preesistente***
- d) *Scelta della struttura di supporto e della modalità di fissaggio***

Per utenze isolate in genere, si dispone di aree di terreno libere che è possibile definire allo scopo



A terra nelle vicinanze dell'utenza, valutando il compromesso tra impatto visivo, captazione di energia e facilità di montaggio

Verifica dell'idoneità del sito

Il sopralluogo ha lo scopo di valutare:

- 2) L'alloggiamento del convertitore e delle altre apparecchiature elettriche in:**
 - **locale riparato (aerato ed assenza di impianti elettrici)**
 - **all'esterno in contenitori antiacido**
- 3) Il percorso dei cavi di cablaggio**
- 4) Le eventuali difficoltà logistiche in fase di costruzione**
- 5) I vincoli di tipo ambientale, paesaggistico dell'area considerata**

Gli impianti solari fotovoltaici

Verifica dell'idoneità del sito

5) I vincoli di tipo ambientale, paesaggistico dell'area considerata

l'accesso al registro e agli incentivi è consentito a condizione (IV Conto Energia) che:

a) la **potenza nominale** di ciascun impianto non sia superiore a 1MWe, nel caso di terreni appartenenti allo stesso proprietario, gli impianti siano collocati ad una distanza non inferiore a 2 km (tale limite debba essere verificato ogni qualvolta venga realizzato un secondo impianto di potenza compresa tra 1 e 1.000 kW (limite massimo di potenza per impianti a terra), su terreni appartenenti al medesimo proprietario);

b) non sia destinato all'installazione degli impianti **più del 10% della superficie** del terreno agricolo nella disponibilità del proponente.

Per quanto riguarda la **distanza minima di 2 km** tra due impianti a terra, tale condizione deve essere rispettata anche nei confronti di impianti fotovoltaici preesistenti, sempre collocati a terra.

Gli impianti solari fotovoltaici

Calcolo della radiazione solare teorica sul piano dei moduli

Mappe isoradiative

E' difficile da tali mappe distinguere la radiazione diffusa da quella diretta

Metodo Liu-Jordan

Calcolo della radiazione diffusa H_{d0}

Calcolo della radiazione diretta H_{d0}

Calcolo della radiazione diretta H

UNI 8477: Calcolo degli apporti di energia solare per applicazioni in edilizia

Percentuale di irraggiamento diretto sulla superficie (form. 7)

ρ = Riflettanza della superficie circostante (prospetto III)

Correzioni da apportare in presenza di ostruzioni (form. 9)

H = Energia raggiante ricevuta dal pannello (formula 1)

Gli impianti solari fotovoltaici

Calcolo della radiazione solare teorica sul piano dei moduli

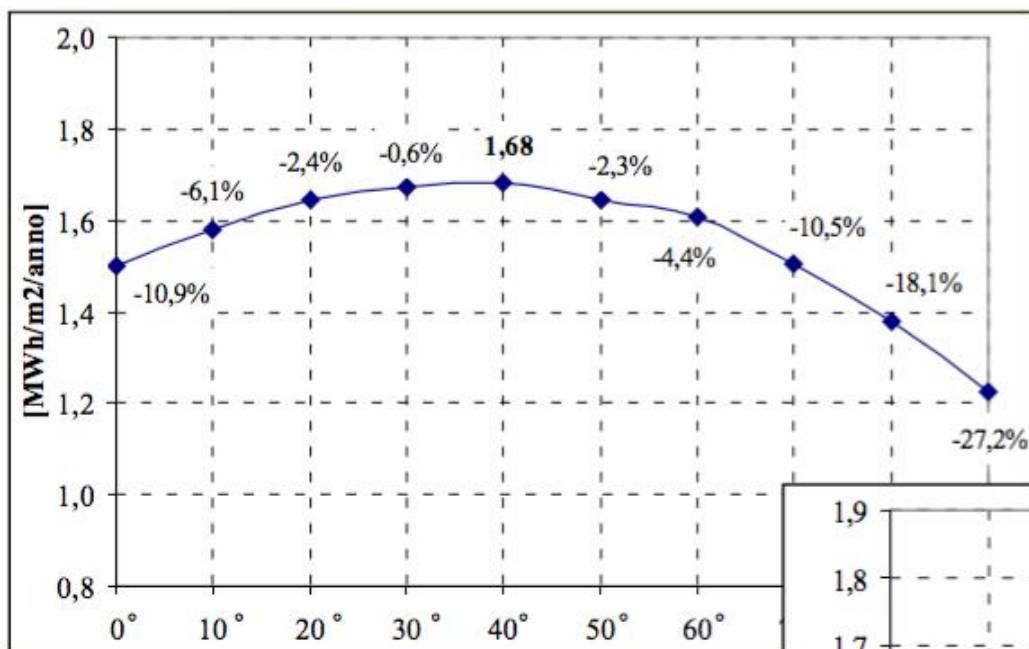
Wh/m²g

Mese	30°	40°	60°
Gennaio	3053	3283	3495
Febbraio	4079	4278	4359
...
Giugno	6676	6189	4898
Luglio	7120	6635	5298
Agosto	6908	6623	5624
...
Novembre	3460	3705	3910
Dicembre	2856	3096	3338
Media ANNO	5125	5069	4624

I dati di irraggiamento relativi al piano inclinato andranno corretti per l'effettivo **angolo di azimuth**

Gli impianti solari fotovoltaici

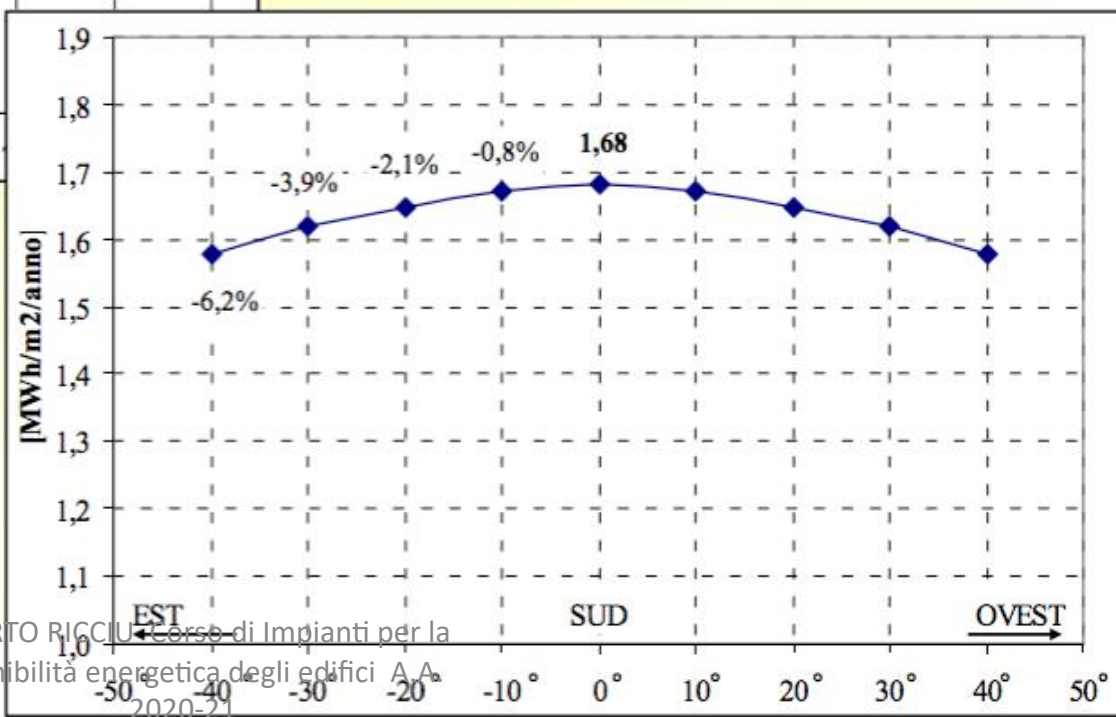
Calcolo della radiazione solare teorica sul piano dei moduli



Massimizzare la raccolta:

- **Estiva** (bassi angoli) per seconde case, rifugi alpini, ecc.
- **Invernale** (alti angoli) per siti remoti inaccessibili per neve

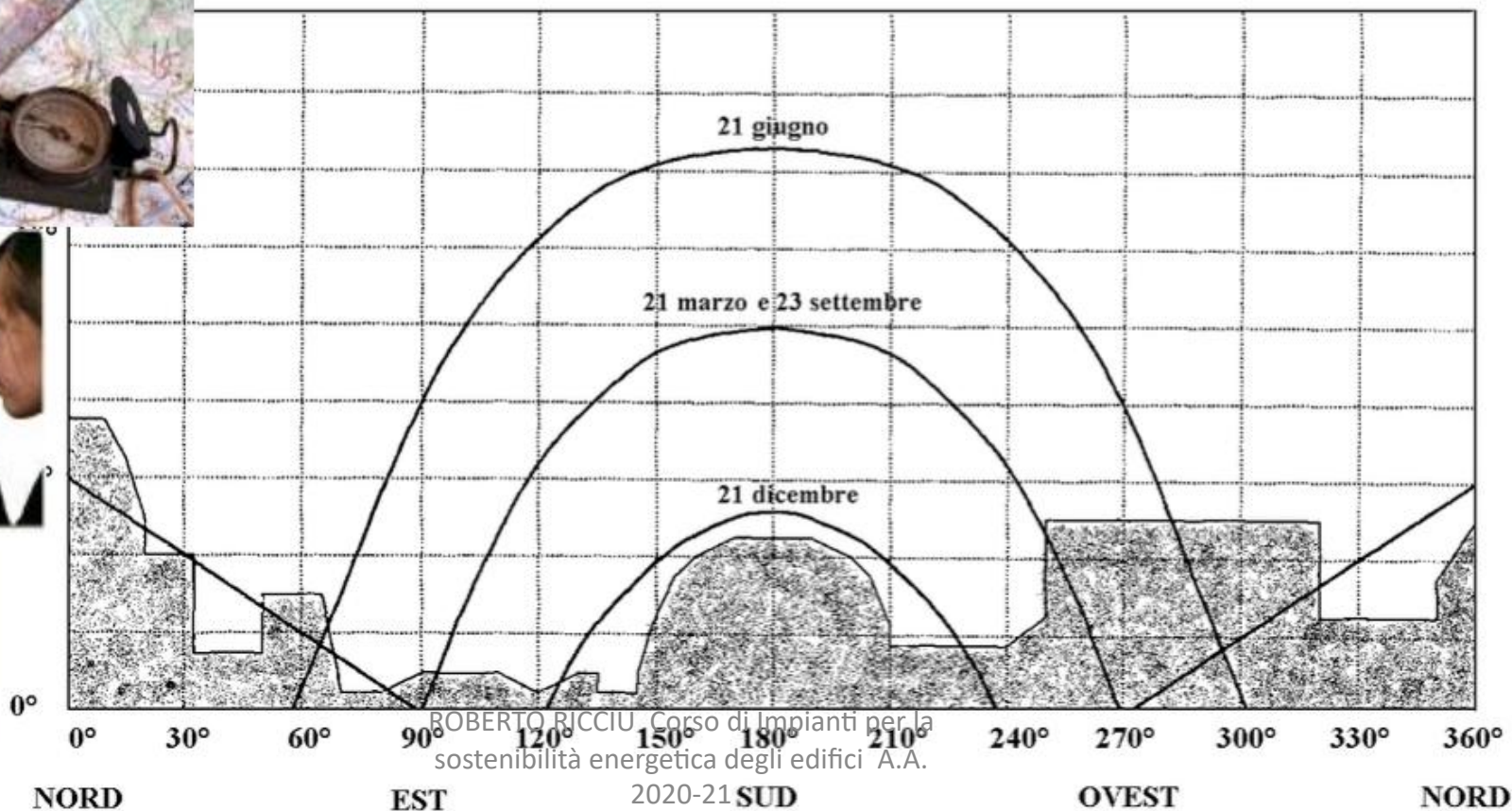
(* Cassino valori medi annui UNI 8477/1)



Gli impianti solari fotovoltaici

Rilievo del diagramma delle ombre

Dal punto centrale dell'area di installazione identificata, con la bussola ed il clinometro si misura ogni 10°, da 70°N a 280°N l'altezza in gradi dell'ostacolo più alto in quella direzione, riportando il tutto sul grafico dei percorsi solari



Gli impianti solari fotovoltaici

Metodologia di calcolo

Utenza collegata alla rete

La taglia del generatore FV e del convertitore è stabilita sulla base del "Budget" (B_{inv}) in euro a disposizione del cliente



P_{max} installabile

$$P_{max} = B_{inv} / C_w \quad (\text{kWp})$$

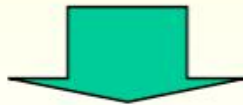
C_w = prezzo di mercato a kWp installato



Scelto il tipo di modulo



Densità di potenza (Wp/m^2)



A_{max} installazione

$$A_{max} = P_{max} * 1000 / D_{mod} \quad (\text{m}^2)$$

Gli impianti solari fotovoltaici

Metodologia di calcolo

Utenza collegata alla rete

Si valuta "l'area disponibile" nel sito A_{disp}



Se: $A_{disp} \geq A_{max}$

$$P_{FV} = P_{max} \quad (\text{kWp})$$

$$C_{FV} = B_{inv} \quad (\text{Euro})$$

Se: $A_{disp} < A_{max}$

$$P_{FV} = A_{disp} * D_{mod} / 1000 \quad (\text{kWp})$$

$$C_{FV} = C_{KW} * P_{FV} \quad (\text{Euro})$$

Gli impianti solari fotovoltaici

Metodologia di calcolo

$$\eta_g = \frac{E_{\text{FORNITA AL CARICO}}}{E_{\text{SOLARE INCIDENTE}}} = \eta_{\text{mod}} \cdot \eta_{\text{bos}}$$

Rendimento del modulo η_{mod}

Rapporto tra l'energia resa ai morsetti e l'energia incidente Dovrebbe essere fornito dal costruttore

In mancanza di dati:

Tipo di modulo	η_{mod}	D_{mod}
Silicio monocristallino	13 %	130 (W/m ²)
Silicio policristallino	11 %	110 (W/m ²)
Silicio amorfo	6.5 %	65 (W/m ²)

ROBERTO RICCIU Corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici A.A.

Gli impianti solari fotovoltaici

Metodologia di calcolo

Rendimento del resto del sistema η_{BOS} (BOS = Balance Of System)

✓ **Scostamento delle condizioni di funzionamento dei moduli rispetto a quelle di targa**

Sul retro sono presenti degli sticker su cui sono riportate le prestazioni elettriche (P, V, I) in STC (25°C – 1000 W/m²)

5 ÷ 8 %

✓ **Riflessione**

Solo grandi superfici chiare circostanti possono aiutare a ridurre il valore

~ 3 %

✓ **Mismatch tra le stringhe**

Sono funzione del carico installato e dipendono dalla non uniformità delle prestazioni elettriche di un modulo (e quindi di una stringa di moduli) rispetto ad un altro

1 % (~ Wp) 3 ÷ 4 % (~ kWp) 5 ÷ 6 % (~ MWp)

✓ **Circuiti in corrente continua**

La resistenza dei cavi elettrici, la resistenza di contatto sugli interruttori, le cadute di tensione sui diodi di protezione delle stringhe

1 ÷ 2 %

Gli impianti solari fotovoltaici

Metodologia di calcolo

Rendimento del resto del sistema η_{BOS} (BOS = Balance Of System)

✓ **Sistema di conversione**

E' funzione della P in uscita e, quindi, delle condizioni di soleggiamento e del carico. La stima cambia a seconda del convertitore (da rete, autocommutato, parallelabile, ecc.) e del tipo di utenza

4 ÷ 10 % (impianti collegati in rete)

8 ÷ 15 % (Utenze isolate)

✓ **Servizi ausiliari (grandi impianti centralizzati)**

Fonti di alimentazione elettrica per sistemi di controllo, acquisizione dati, circuiti di emergenza, ecc. e apparecchiature speciali (filtraggio delle armoniche)

1 ÷ 2 % (1 punto in più con filtraggio)

✓ **Basso soleggiamento e/o ombreggiamento reciproco**

2 ÷ 5 %

✓ **Polluzione sui moduli**

Sono strettamente legate al sito e, quindi, alle condizioni meteorologiche. Le perdite maggiori corrispondono a bassa piovosità

ROBERTO RICCIU Corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici A.A.

Gli impianti solari fotovoltaici

Metodologia di calcolo

Rendimento di conversione $\eta_g = \eta_{mod} * \eta_{BOS}$

	Con conv. cc/ca	Senza conv. cc/ca
Silicio monocristallino	8.1 %	9.1 %
Silicio policristallino	6,8 %	7,7 %
Silicio amorfo	4,0 %	4,5 %

Gli impianti solari fotovoltaici

Metodologia di calcolo

Utenza collegata alla rete

Un'utenza isolata va dimensionata in funzione del **carico elettrico** da alimentare

Un'utenza collegata in rete **deve convertire** l'energia solare in elettrica **con la max efficienza** senza preoccuparsi dei carichi locali



Non è necessario l'accumulo di energia



Risparmio di circa il 25% sui CI

ROBERTO RICCI - corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici - A.A.

2020-21

Gli impianti solari fotovoltaici

Valutazione della producibilità

Il parametro più utilizzato dai tecnici per indicare la producibilità di un impianto fotovoltaico in un certo sito è la radiazione solare specifica (E_r) incidente sulla superficie del generatore fotovoltaico in un dato periodo Δt (giorno, mese o anno), espressa in modo pratico in “ore equivalenti solari” h_s :

$$h_{S(\Delta t)} = \frac{E_{r(\Delta t)}}{1 \text{ kW} / \text{m}^2}$$

cioè intendendo queste come numero di ore annue di piena luce (con le rimanenti senza luce). Si consideri che nelle condizioni di “pieno sole” si ha una radiazione luminosa di circa $1.000 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ kW/m}^2$

Esempio:

Se $\Delta t = 1$ giorno e pervenendo $4,5 \text{ kWh}$ di energia solare sulla superficie di 1 m^2 , allora:
 h_s (giorno) = $4,5 \text{ kWh/m}^2 / 1 \text{ kW/m}^2 = 4,5$ ore equivalenti di “pieno sole” e $19,5 \text{ h}$ di buio

Se $\Delta t = 1$ anno e pervenendo in media $4,5 \text{ kWh/giorno}$ di energia solare sulla superficie di 1 m^2 , si ha:

h_s (anno) = $(4,5 \text{ kWh/m}^2/\text{giorno} * 365 \text{ giorni}) / 1 \text{ kW/m}^2 = 1642 \text{ h}$ equivalenti di pieno sole

Gli impianti solari fotovoltaici

Valutazione della producibilità

La produzione elettrica attesa dall'impianto durante il periodo considerato, **espressa in ore equivalenti di picco h_{eq}** (cioè in ore di funzionamento dell'impianto alla sua potenza di picco) è dato dalla:

$$h_{eq(\Delta t)} = h_{s(\Delta t)} \cdot K \cdot \eta_{PV} \cdot \eta_{INV}$$

dove:

K = 0,90 ÷ 0,98 per impianti non soggetti a rilevanti ombreggiamenti sistematici

η_{PV} è il rendimento del generatore fotovoltaico a valle del processo di conversione dei singoli moduli = 0,85 ÷ 0,90

η_{INV} = 0,90

La produzione elettrica attesa dell'impianto in un dato periodo impianto Δt (giorno, mese o anno), **espressa in kWh**, è quindi:

$$E_{P(\Delta t)} = P_{NOM} * h_{eq(\Delta t)}$$

ROBERTO RICCIU Corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici A.A.
2020-21

Con **P_{NOM}** = alla potenza nominale del generatore fotovoltaico [kWp]

Gli impianti solari fotovoltaici

Valutazione della producibilità

Per i grandi impianti h_{eq} va ulteriormente corretta per le perdite dei quadri e circuiti in cc !!!

Per una più accurata valutazione del rendimento, è possibile scindere le perdite termiche ζ_{TERM} del generatore fotovoltaico da quelle tipiche dell'impianto (ottiche, resistive, caduta sui diodi, mismatch) che tipicamente ammontano all'8%:

$$\eta_{PV} = (1 - \zeta_{TERM} - 0,08)$$

Gli impianti solari fotovoltaici

Normativa di riferimento

NORMA CEI 82-25 – Guida alla realizzazione di sistemi di generazione fotovoltaica collegati alle reti elettriche di media e bassa tensione

NORMA CEI 64-8 – Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000V in corrente alternata e a 1500V in corrente continua

NORMA CEI 11-20 - “Impianti di produzione di energia elettrica e gruppi di continuità collegati a reti di I e II categoria”. *Tale Norma regola, tra gli altri, gli impianti fotovoltaici di produzione di potenza complessiva superiore a 0,75 kW collegati alle reti dei distributori.*

IMPORTANTE sia in fase di progettazione e manutenzione: **è impossibile porre fuori tensione il generatore fotovoltaico alla presenza di luce solare!!!**

Gli impianti solari fotovoltaici

Caratteristiche elettriche del generatore

Usualmente dimensioni fra 0,5 m e 1,5 m , ma sono disponibili commercialmente moduli di grandi dimensioni (superiore a 2 m).



Vantaggio: presentano costi di installazione inferiori nei grandi impianti rispetto ai moduli di dimensioni usuali.

Ciascun modulo deve essere accompagnato da un foglio-dati che riporta le principali caratteristiche del modulo stesso (**I_{sc} , V_{oc} , I_m , V_m , P_m , tolleranza %, ecc.**) e la temperatura nominale di lavoro della cella (**NOCT**), secondo la Norma CEI EN 50380

Descrizione		Simbolo
Tipo Cella	Mono/Poli	
Numero celle	nr	
Dimensione cella	mm	
Potenza massima di picco	Watt	W_p
Tensione a circuito aperto	Volt	V_{oc}
Corrente di corto circuito	Ampere	I_{sc}
Tensione alla massima potenza	Volt	V_{pm}
Corrente alla massima potenza	Ampere	I_{pm}
Efficienza della cella	η_c	%
Efficienza del modulo	η_m	%
Altezza	mm	
Larghezza	mm	
Profondità	mm	
Peso	Kg	
Tolleranza	%	

Gli impianti solari fotovoltaici

Scelta della tensione nella sezione in c.c.

- **Tensione massima:** somma delle V_{oc} dei moduli fotovoltaici collegati tra loro in serie (stringhe); nel caso in cui il sistema sia scollegato da carichi o da convertitori di potenza, la sezione in c.c. si porta alla tensione massima
- **Tensione di funzionamento:** punto di lavoro del generatore fotovoltaico:
 - ✓ per un sistema ad accoppiamento diretto generatore-batterie, esso risulta *dall'incontro della caratteristiche* tensione tensione-corrente dei due componenti
 - ✓ per sistemi collegati a dispositivi elettronici di conversione dell'energia, tale punto corrisponde normalmente al *punto di massima potenza* (funzione MPPT), al fine di ottimizzare la resa energetica dell'impianto

Gli impianti solari fotovoltaici

Scelta della tensione nella sezione in c.c.

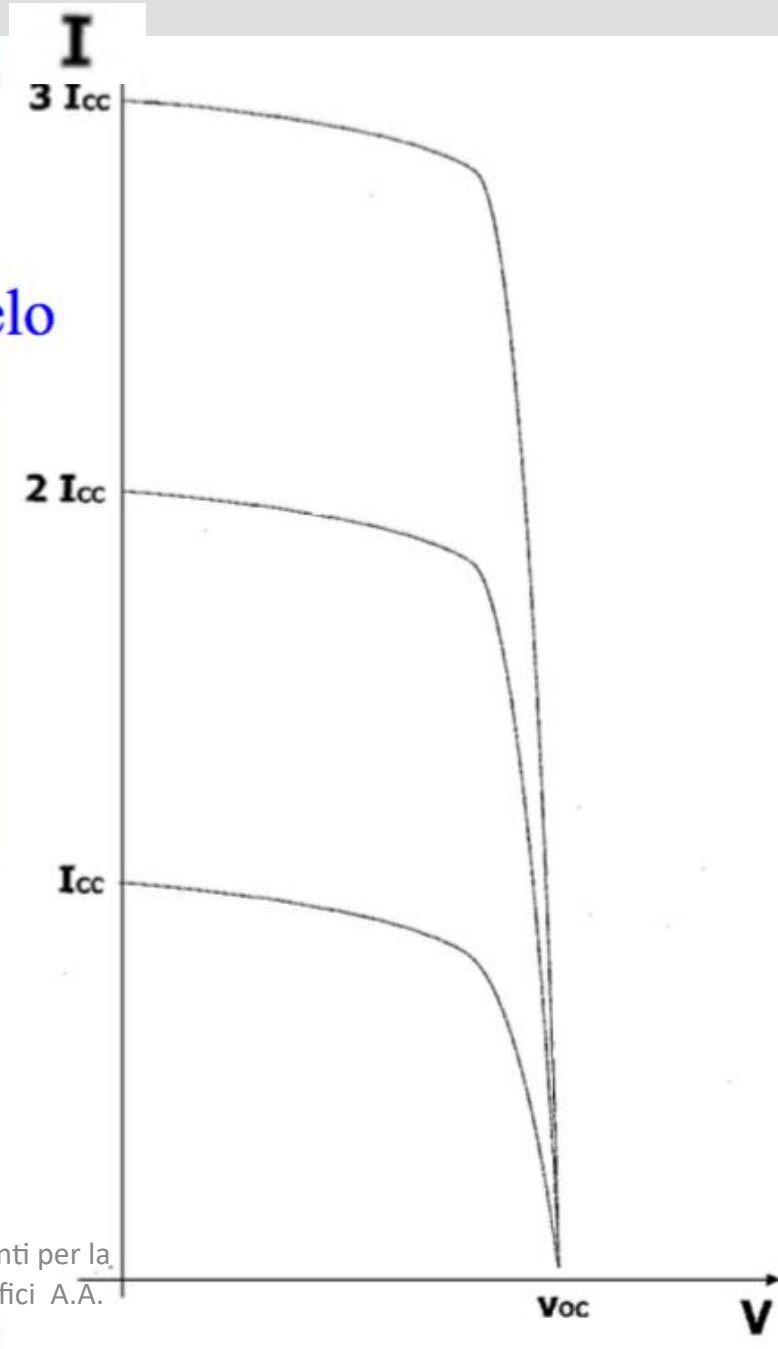
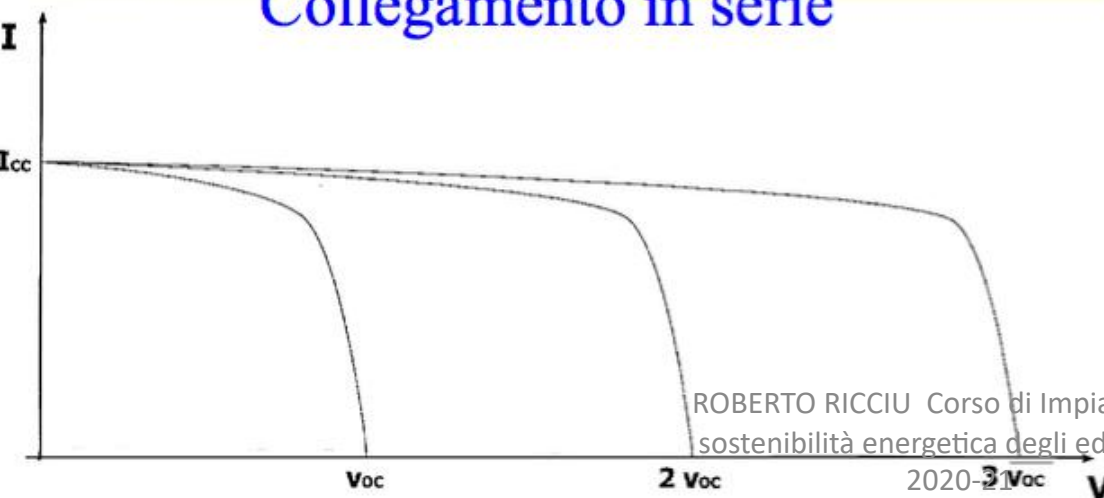
	Conergy PowerPlus 200P	Conergy PowerPlus 205P	Conergy PowerPlus 210P	Conergy PowerPlus 215P	Conergy PowerPlus 220P	Conergy PowerPlus 225P	Conergy PowerPlus 230P
Moduli policristallini							
Potenza (P_{mpp}) in accordo con STC ¹	200 Wp	205 Wp	210 Wp	215 Wp	220 Wp	225 Wp	230 Wp
Tolleranza della potenza	-0/+2,5%	-0/+2,5%	-0/+2,5%	-0/+2,5%	-0/+2,5%	-0/+2,5%	-0/+2,5%
Efficienza del modulo	12,29%	12,59%	12,90%	13,21%	13,51%	13,82%	14,13%
Tensione MPP (U_{mpp})	28,52 V	28,56 V	28,65 V	28,80 V	29,01 V	29,23 V	29,54 V
Corrente MPP (I_{mpp})	7,09 A	7,26 A	7,41 A	7,54 A	7,65 A	7,74 A	7,82 A
Tensione a vuoto (U_{oc})	35,29 V	35,53 V	35,77 V	36,00 V	36,23 V	36,43 V	36,66 V
Corrente di cortocircuito (I_{sc})	7,72 A	7,83 A	7,94 A	8,04 A	8,15 A	8,24 A	8,34 A
Coefficiente di temperatura (P_{mpp})	-0,45 %/°C	-0,45 %/°C	-0,45 %/°C	-0,45 %/°C	-0,45 %/°C	-0,45 %/°C	-0,45 %/°C
Coefficiente di temperatura (U_{oc}) assoluta	-0,120 V/°C	-0,121 V/°C	-0,122 V/°C	-0,122 V/°C	-0,123 V/°C	-0,124 V/°C	-0,125 V/°C
Coefficiente di temperatura (U_{oc}) percentuale	-0,34 %/°C	-0,34 %/°C	-0,34 %/°C	-0,34 %/°C	-0,34 %/°C	-0,34 %/°C	-0,34 %/°C
Coefficiente di temperatura (I_{sc}) assoluta	+3,9 mA/°C	+3,9 mA/°C	+4,0 mA/°C	+4,0 mA/°C	+4,1 mA/°C	+4,1 mA/°C	+4,2 mA/°C
Coefficiente di temperatura (I_{sc}) percentuale	+0,05 %/°C	+0,05 %/°C	+0,05 %/°C	+0,05 %/°C	+0,05 %/°C	+0,05 %/°C	+0,05 %/°C
Tensione massima di sistema	1000 V						
Dimensioni (Lung x Largh x Alt)	1.651 x 986 x 46 mm						
Peso	22kg						
Certificazioni	In accordo con IEC/EN 61215 Ed. 2, IEC/EN 61730						
Garanzia prodotto ²	5 anni, può essere estesa a 10 su richiesta						
Garanzia sulla potenza ²	ROBERTO RICCIU Corso di Impianti per la sostenibilità energetica degli edifici A.A. 12/92 - 25/80 anni/%						

Gli impianti solari fotovoltaici

Scelta della tensione nella sezione in c.a.

Collegamento in parallelo

Collegamento in serie



Gli impianti solari fotovoltaici

Scelta della tensione nella sezione in c.c.

Sia la **tensione massima** che la **tensione di funzionamento** variano:

- in modo **inverso** alla **temperatura di funzionamento** dei moduli fotovoltaici particolarmente in Si cristallino. *In situazioni climatiche molto fredde, la tensione massima effettiva del generatore può superare quella di progetto*

$$V_{OC}(T) = V_{OC,STC} - \beta * (25 - T_{CEL})$$

β dipende dalla tipologia del modulo fotovoltaico (in genere $-0,15 \text{ V}/^\circ\text{C}$ per Silicio cristallino, valori più precisi sono riportati sui datasheet dei moduli)

Scelta della tensione nella sezione in c.c.

Sia la **tensione massima** che la **tensione di funzionamento** variano:

➤ in modo **diretto** con l'**irraggiamento** incidente sui moduli fotovoltaici.

L'irraggiamento solare G può raggiungere valori di circa 1200 W/m^2 .

$$V_{OC} = V_{OC,STC} - N_S \left[D \ln \left(\frac{G_{STC}}{G_P} \right) - \beta \frac{dT_J}{dG} G_P + \beta (T_{STC} - T_A) \right]$$

$V_{OC,STC}$ è la tensione a vuoto alle condizioni di prova standard

T_A è la temperatura ambiente

N_S è il numero di celle in serie nella stringa

$D = (kTA/q) \cong 37.5 \text{ mV}$ è il prodotto del fattore di non-idealità A (ca 1.5) e della tensione termica kT/q (ca 25 mV) del diodo

β è il coefficiente di tensione per la temperature (-2.2 mV/°C/cella, per celle in silicio cristallino);

dT_J/dG è un coefficiente che può essere determinato tramite il valore della temperatura nominale di lavoro dei moduli utilizzati, **NOCT**:

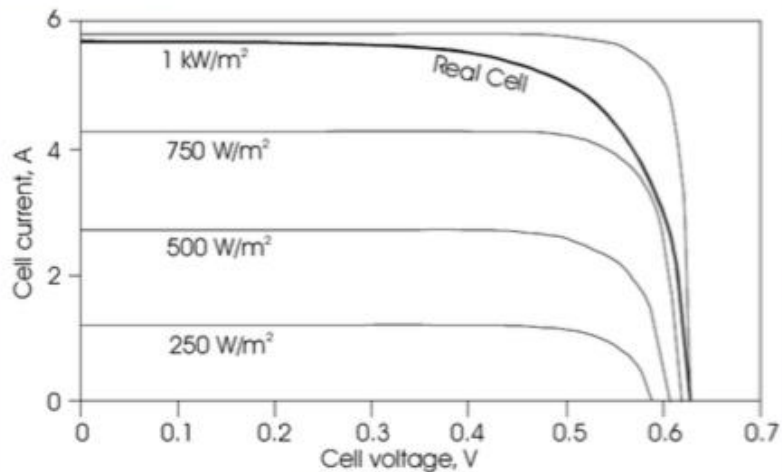
$$\frac{dT_J}{dG} = \frac{NOCT - 20}{800}$$

ROBERTO RICCU' Corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici A.A.

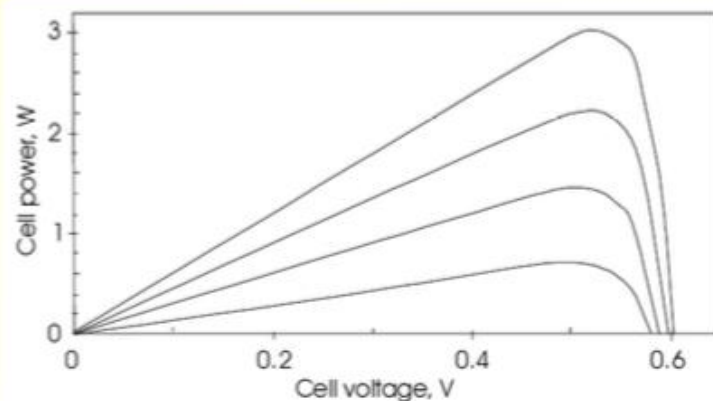
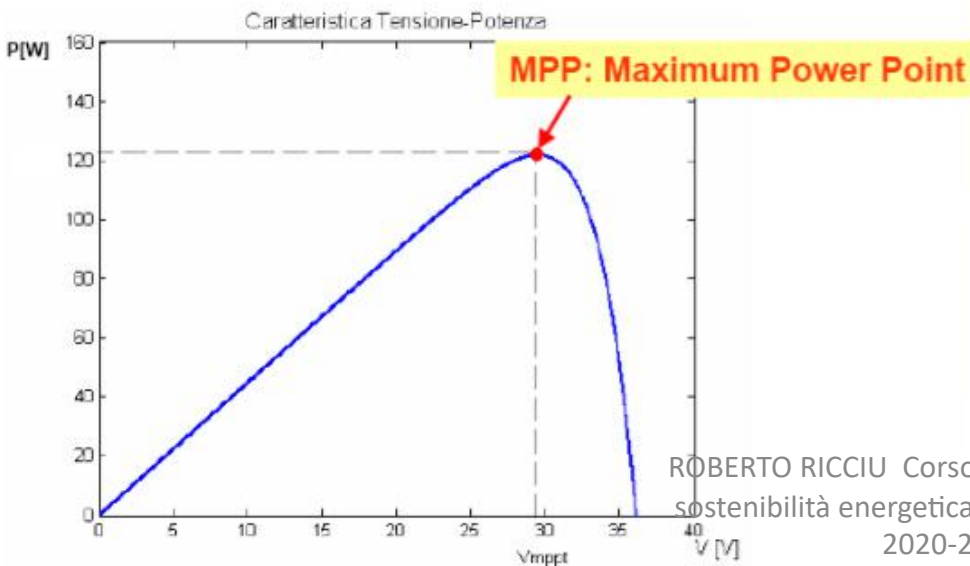
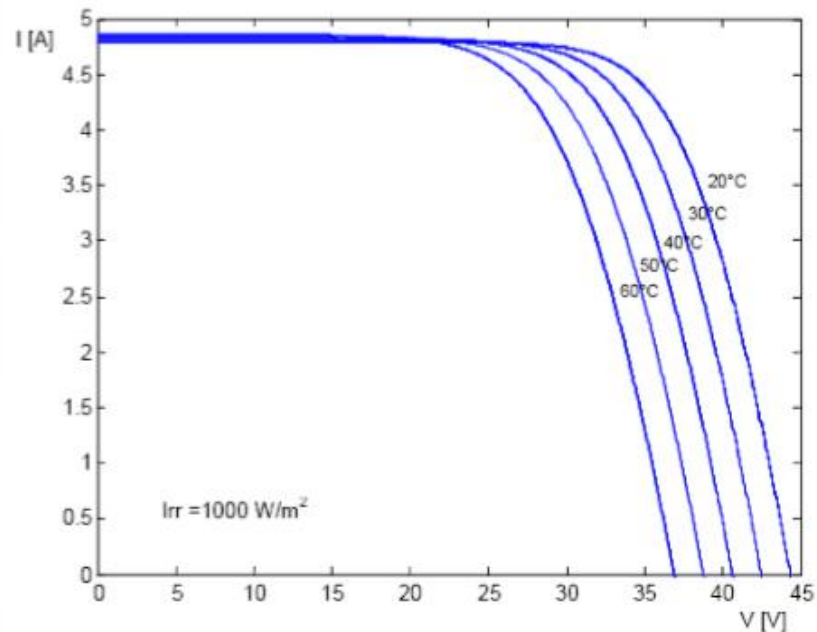
Gli impianti solari fotovoltaici

Scelta della tensione nella sezione in c.c.

Caratteristica Tensione (V) – Corrente (I)
al variare dell'irraggiamento



Caratteristica Tensione (V) – Corrente (I)
variare della temperatura



MPP: punto dove la derivata della potenza $\partial P/\partial V = 0$

Gli impianti solari fotovoltaici

Scelta della tensione nella sezione in c.c.

	Conergy PowerPlus 200P	Conergy PowerPlus 205P	Conergy PowerPlus 210P	Conergy PowerPlus 215P	Conergy PowerPlus 220P	Conergy PowerPlus 225P	Conergy PowerPlus 230P
Moduli policristallini							
Potenza (P_{mpp}) in accordo con STC ¹	200 Wp	205 Wp	210 Wp	215 Wp	220 Wp	225 Wp	230 Wp
Tolleranza della potenza	-0/+2,5%	-0/+2,5%	-0/+2,5%	-0/+2,5%	-0/+2,5%	-0/+2,5%	-0/+2,5%
Efficienza del modulo	12,29%	12,59%	12,90%	13,21%	13,51%	13,82%	14,13%
Tensione MPP (U_{mpp})	28,52 V	28,56 V	28,65 V	28,80 V	29,01 V	29,23 V	29,54 V
Corrente MPP (I_{mpp})	7,09 A	7,26 A	7,41 A	7,54 A	7,65 A	7,74 A	7,82 A
Tensione a vuoto (U_{oc})	35,29 V	35,53 V	35,77 V	36,00 V	36,23 V	36,43 V	36,66 V
Corrente di cortocircuito (I_{sc})	7,72 A	7,83 A	7,94 A	8,04 A	8,15 A	8,24 A	8,34 A
Coefficiente di temperatura (P_{mpp})	-0,45 %/°C	-0,45 %/°C	-0,45 %/°C	-0,45 %/°C	-0,45 %/°C	-0,45 %/°C	-0,45 %/°C
Coefficiente di temperatura (U_{oc}) assoluta	-0,120 V/°C	-0,121 V/°C	-0,122 V/°C	-0,122 V/°C	-0,123 V/°C	-0,124 V/°C	-0,125 V/°C
Coefficiente di temperatura (U_{oc}) percentuale	-0,34 %/°C	-0,34 %/°C	-0,34 %/°C	-0,34 %/°C	-0,34 %/°C	-0,34 %/°C	-0,34 %/°C
Coefficiente di temperatura (I_{sc}) assoluta	+3,9 mA/°C	+3,9 mA/°C	+4,0 mA/°C	+4,0 mA/°C	+4,1 mA/°C	+4,1 mA/°C	+4,2 mA/°C
Coefficiente di temperatura (I_{sc}) percentuale	+0,05 %/°C	+0,05 %/°C	+0,05 %/°C	+0,05 %/°C	+0,05 %/°C	+0,05 %/°C	+0,05 %/°C
Tensione massima di sistema	1000 V						
Dimensioni (Lung x Largh x Alt)	1.651 x 986 x 46 mm						
Peso	22kg						
Certificazioni	In accordo con IEC/EN 61215 Ed. 2, IEC/EN 61730						
Garanzia prodotto ²	ROBERTO RICCIU Corso di Impianti per la sostenibilità energetica degli edifici A.A. 5 anni, può essere estesa a 10 su richiesta						
Garanzia sulla potenza ²	12/92 - 25/80 anni/%						

Gli impianti solari fotovoltaici

Scelta della tensione nella sezione in c.c.

Per ogni modello di inverter sono definite infatti:

la **massima tensione continua applicabile** in ingresso



V_{OC} del campo fotovoltaico, stimata alla t_{MIN} di funzionamento prevista, **deve essere inferiore** a tale valore di tensione.

un **campo di valori di tensione d'ingresso** di normale funzionamento



il valore minimo di funzionamento è il più importante, in quanto indica la minima tensione continua in ingresso che mantiene accesa la logica di controllo e/o permette la corretta erogazione nella rete del distributore anche a basse insolazioni (alba e tramonto)

è importante, ai fini dell'efficienza complessiva dell'impianto, che il convertitore riesca a fare lavorare il campo fotovoltaico sempre nelle condizioni di massima potenza



Alcuni inverter commerciali



	IG15	IG20	IG30	IG40	IG60
Gamma Tensione MPPT	150-400 Vdc				
Tens. Max Ingresso	(a 100W/m ² / -10° a vuoto) 500 Vdc				
Corrente max. in entrata Acc	10.75	14.34	19	29.4	35.84
P nominale Kw	1,3	1,8	2,5	3,5	5
P max in uscita	1,5	2,05	2,45	4,1	5
Corrente nominale A	5,7	7,0	10,9	15,22	20
Contributo alla corrente di c.to c.to	6,52	8,7	11,52	17,83	21,74
Tensione di Rete Nominale	230 V, +10 / -15 % *				
Frequenza nominale	Hz 50 +/- 0,2 Hz *				
Fattore di Potenza	1				
Fattore di Distorsione	< 3%				
Dati Generali	IG15	IG20	IG30	IG40	IG60
Rendimento Max	94,2%	94,3%	94,3%	94,3%	94,3%
Rendimento EURO	91,4%	92,3%	92,7%	93,5%	93,5%
Autoconsumo notte	0,15 w *				
Autoconsumo giorno	7 w			12 w	
Raffreddamento	Aerazione Forzata Regolata				
Protezione Involucro (Std/Optional)	IP 21 / IP 45				
Misure mm LxHxP (vers. IP45)	366x344x220 (500x435x225)			610x344x220 (733x435x225)	
Peso (Kg)	9 (12)			16 (20)	
T° ambiente max (95% Umidità)	-20 + 50° **				
Dispositivi di protezione	IG15	IG20	IG30	IG40	IG60
Misure di isolamento DC	Avviso a Riso < 500 Kohm				
Protezione sovratensione DC	integrata				
Protezione inversa tensione DC	integrata				
Comportamento con Sovraccarico DC	Spostamento del punto di lavoro				

ROBERTO RICCIU Corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici (AA)

Gli impianti solari fotovoltaici

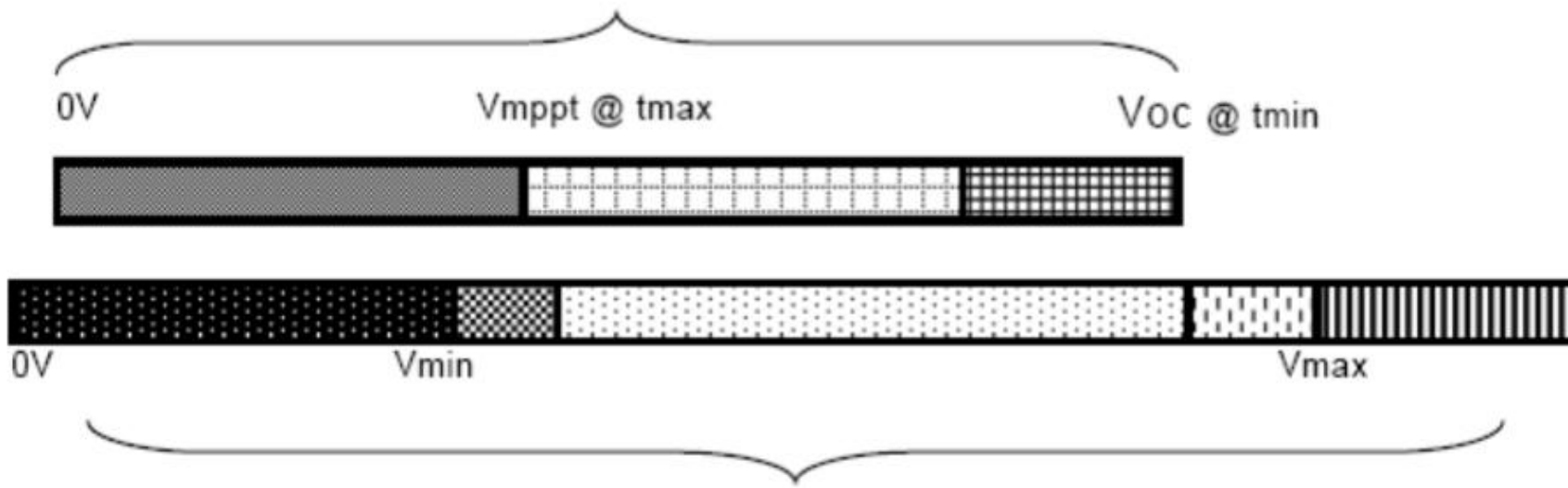
Scelta della tensione nella sezione in c.c.

Il valore T_{max} di temperatura dovrebbe invece tenere conto della temperatura massima a cui può arrivare un modulo fotovoltaico con la temperatura dell'aria massima ipotizzabile per il sito, in assenza di vento e con elevati irraggiamenti. In genere si adotta $T_{max} = 70^{\circ}\text{C}$

$$V_M(T_{MAX}) > V_{MPPT,MIN} \text{ di funzionamento dell'inverter in MPPT}$$

Alcuni convertitori adottano un **valore minimo** di funzionamento della tensione c.c. in ingresso, variabile **dinamicamente** con l'ampiezza della tensione della rete del distributore: al crescere della tensione della rete del distributore viene elevato il limite inferiore di funzionamento.

Campo di funzionamento del campo FV



Campo di funzionamento d.c. dell'inverter



Mancata accensione dell'inverter



Eventuale dipendenza del limite inferiore di funzionamento dalla tensione della Rete



Funzionamento sicuro



Blocco per sovratensione di ingresso



Possibile danneggiamento dell'inverter

Gli impianti solari fotovoltaici

Scelta della tensione nella sezione in c.c.

In sostanza:

LATO INVERTER

LATO GENERATORE

$$V_{MAX} >$$

$$V_{OC}(T_{MIN})$$

$$V_{MPPT,min} <$$

$$V_{MPPT}(T_{MAX})$$

$$V_{MPPT,max} >$$

$$V_{MPPT}(T_{MIN})$$

Gli impianti solari fotovoltaici

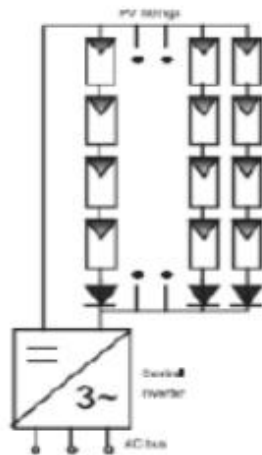
L'inverter negli impianti fotovoltaici

SCHEMI DI COLLEGAMENTO ALL'INVERTER

ALL'INVERTER

SCHEMI DI COLLEGAMENTO

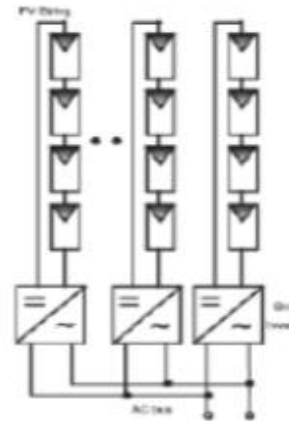
Inverter centralizzato



Inverter Centralizzati.

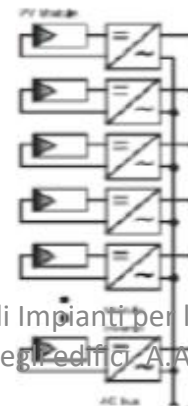
- Tipicamente utilizzati in impianti FV di grossa taglia per ridurre i costi di installazione rispetto ai sistemi distribuiti
- Taglia tipica inverter >50KW
- Alta efficienza, bassi costi, MPPT non ottimale

Inverter a stringa



- Massima flessibilità di installazione grazie alla modularità
- Migliore immunità ai guasti.
- Maggiore efficienza e resa energetica rispetto ai centralizzati (migliori prestazioni di MPPT)
- Sostanzialmente più costoso della soluzione centralizzata a livello di componente
- Taglia tipica inverter <10KW

Inverter modulare



- 50-400W, ogni pannello ha il suo inverter, ulteriore miglioramento dell'MPPT
- Bassa efficienza
- Difficile manutenzione

Gli impianti solari fotovoltaici

Sottocampi fotovoltaici: quando?

- ✓ le stringhe di moduli sono tra loro distanti o sono in numero elevato, per cui è preferibile un loro iniziale raggruppamento in più sottocampi anziché in un unico campo fotovoltaico
- ✓ la potenza complessiva del generatore fotovoltaico è superiore a quella massima consentita da un singolo inverter (o altro dispositivo di condizionamento della potenza) che si ha intenzione di utilizzare; è necessario pertanto il frazionamento per raggiungere la potenza prevista
- ✓ i moduli fotovoltaici non possono essere tutti orientati allo stesso modo (ad esempio perché disposti su una copertura a volta o su una superficie sfaccettata o, ancora, perché suscettibili di essere ombreggiati in modo non uniforme). Al fine di evitare sbilanciamenti di potenza che si traducono in perdite di efficienza, è buona regola progettare il sistema suddividendo il generatore fotovoltaico in tanti sottocampi quanti sono i differenti orientamenti dei moduli che lo compongono
- ✓ è necessario utilizzare moduli fotovoltaici di marca e/o modello differenti: i vari sottocampi conterranno allora gruppi omogenei di moduli.

Gli impianti solari fotovoltaici

L'inverter negli impianti fotovoltaici

SCHEMI DI COLLEGAMENTO ALL'INVERTER

ALL'INVERTER

SCHEMI DI COLLEGAMENTO

Configurazione di uscita degli inverter in
Europa

	Allacciamento bt 1 ÷ 6 kW	Allacciamento bt > 6 kW	Allacciamento MT
Rete elettrica	I categoria	I categoria	II categoria
Allacciamento monofase	Consentito	Non consentito	Non consentito
Separazione galvanica cc/ca	Non obbligatoria per allacciamento monofase (*)	Obbligatoria	Obbligatoria

(*) Qualora non vi sia separazione galvanica tra parte in continua e parte in alternata occorre comunque adottare una protezione sensibile alla presenza di una eventuale componente continua in uscita.

Requisito Base	Germania VDE0126	Italia ENEL DK5940	Spagna Real Decreto
Sistema 1F / 3F	1F fino a 4.6KW 3F oltre 4.6KW	1F fino a 6KW 3F oltre 6KW	1F fino a 5KW 3F oltre 5KW
Trasformatore di Isolamento	Non richiesto (raccomandato oltre 100KW)	Obbligatorio oltre i 20KW	Raccomandato oltre i 100KW
BT (230/380Vac) MT (10KVac - 30KVac)	BT fino a 100KW; Da definire oltre 100KW	BT fino a 50KW (75KW) MT oltre i 75KW	Come in Germania. Da concordare con il gestore locale

L'inverter negli impianti fotovoltaici

CARATTERISTICHE DELL'INVERTER

CARATTERISTICHE DELL'INVERTER

L'efficienza elettrica dei circuiti e la sua variabilità rispetto alle condizioni di funzionamento

La precisione statica e dinamica dell'algoritmo di controllo del Punto di Massima Potenza (Maximum Power Point Tracking – MPPT)

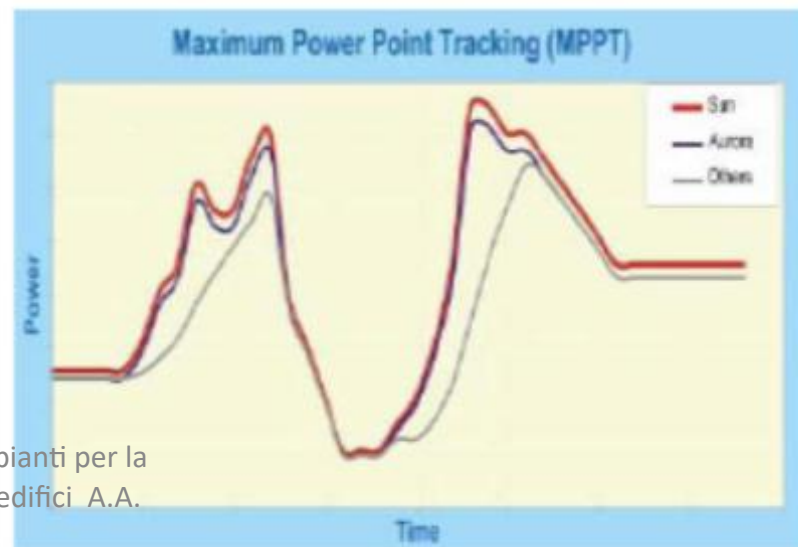
La stabilità della connessione alla rete in presenza di disturbi e micro-interruzioni

La possibilità di frazionare il campo fotovoltaico

MPPT

L'inverter deve controllare i moduli affinché operino sempre nel loro punto di massima potenza (Maximum Power Point Tracking)

Se l'inseguimento non avviene in modo "preciso" e "veloce" le perdite di resa energetica possono essere significative, specialmente in condizioni ambientali e di irraggiamento variabili



Gli impianti solari fotovoltaici

Alcuni inverter commerciali

INVERTER COMMERCIALI

SIEL

ENERGY & SAFETY



MODELLO	SOLETL 80kWp	SOLETL 100kWp	SOLETL 125kWp	SOLETL 175kWp	SOLETL 250kWp	SOLETL 400kWp	SOLETL 500kWp	
PARAMETRI DI INGRESSO								
Potenza raccomandata moduli (kWp)	67 - 88	88 - 110	115 - 140	140 - 190	190 - 270	300 - 440	450 - 550	
Tensione min/max di MPPT [V]	330/600	330/600	330/600	330/600	330/600	330/600	330/600	
Tensione max di ingresso a 0°C (V)	700	700	700	700	700	700	700	
Corrente massima moduli (A)	245	305	380	500	750	1200	1600	
PARAMETRI DI USCITA								
Potenza massima (kW)	72	90	112,5	157,5	225	360	450	
Monofase/Trifase	3f+N	3f+N	3f+N	3f+N	3f+N	3f+N	3f+N	
Tensione nominale (V)	400	400	400	400	400	400	400	
Distorsione armonica (%)	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	
Separazione galvanica	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	
Rendimento di conversione max (efficienza) %	95,5	96	96,3	96,5	96,5	96,5	96,5	
Euro rendimento %	94,1	94,8	95,1	95,2	95,4	95,4	95,4	
Fattore di potenza	1	1	1	1	1	1	1	
CARATTERISTICHE GENERALI								
Temperatura operativa (°C)	-5/+40°C	-5/+40°C	-5/+40°C	-5/+40°C	-5/+40°C	-5/+40°C	-5/+40°C	
Livello acustico (dBA)	< 64	< 64	< 64	< 64	< 68	< 69	< 70	
Dimensioni (LxPxH) mm	1100x800x1400				1350x1000x2000			
Grado di protezione							IP20	
Peso (kg)	600	670	700	850	1000	1300	1600	

ROBERTO RICCIU - Corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici - A.A.

Gli impianti solari fotovoltaici

Configurazioni serie parallelo

Si deve verificare che le caratteristiche elettriche delle stringhe (incluso corrente di cortocircuito, tensione a vuoto, corrente e tensione alla massima potenza), siano per quanto possibile simili per:

- tipo di modulo
- classe di corrente del modulo
- esposizione dei moduli (azimuth, elevazione e ombreggiamento)
- numero dei moduli in serie..



migliori prestazioni del generatore

in caso di guasto, la sostituzione dei moduli con moduli dello stesso tipo non comporta variazioni delle caratteristiche elettriche delle stringhe

Stringhe, che non rispondano all'uniformità suddetta, dovrebbero essere utilizzate separatamente o collegate a distinti gruppi di conversione!

Configurazioni serie parallelo

Il numero di stringhe da cablare in parallelo discende dalla potenza che si intende installare e dal livello di tensione DC scelto per il singolo pannello.

Ipotizzando una installazione da **3kW**, con una **Vdc di 200 V**

Nota la corrente di stringa, pari alla corrente del modulo meno performante (**4.05A** nel caso in esame)

$$\text{Si avrà: } \frac{3000W}{200V} = 15A \quad \Rightarrow \quad \frac{15A}{4,05A} \cong 3,7$$

In definitiva è necessario installare un numero di stringhe pari a 4, ottenendo:

$$I_{PMax} = 4 \cdot 4,05A = 16,2A \quad P_{MAX} = 200V \cdot 16,2A \cong 3250W$$

ROBERTO RICCIU Corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici A.A.

Gli impianti solari fotovoltaici

Disposizioni delle stringhe su piano inclinato

- L è la lunghezza del pannello
- d è la distanza minima per evitare ombreggiamenti al solstizio d'inverno del pannello successivo
- β è l'angolo di inclinazione del pannello rispetto all'orizzontale
- γ è l'angolo di inclinazione del terreno rispetto all'orizzontale
- δ è l'angolo di declinazione al solstizio d'inverno

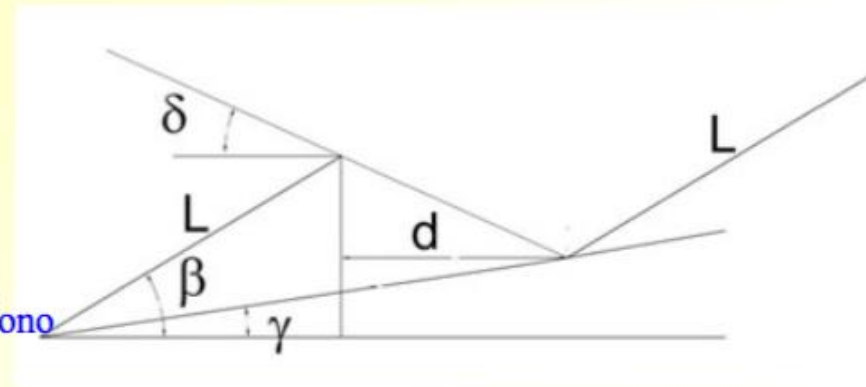
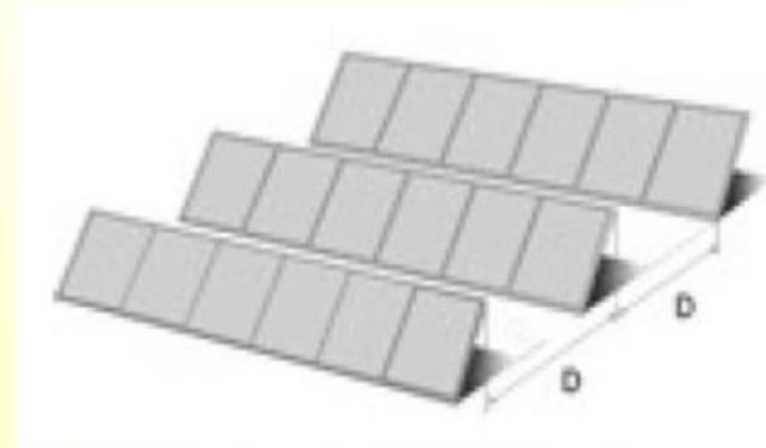
$$L \cdot \sin(\beta) = d \cdot \tan(\delta) + d \cdot \tan(\gamma) + L \cdot \cos(\beta) \cdot \tan(\gamma)$$



$$d = L \cdot \frac{\sin(\beta) - \cos(\beta) \cdot \tan(\gamma)}{\tan(\delta) + \tan(\gamma)}$$

Nel caso di profilo collinare con pendenza variabile lungo l'asse, a diversi valori di pendenza, lungo il campo fotovoltaico, corrispondono diverse distanze minime tra i pannelli.

La distanza minima su terreno, dovrebbe poter garantire il passaggio di un mezzo di lavoro.



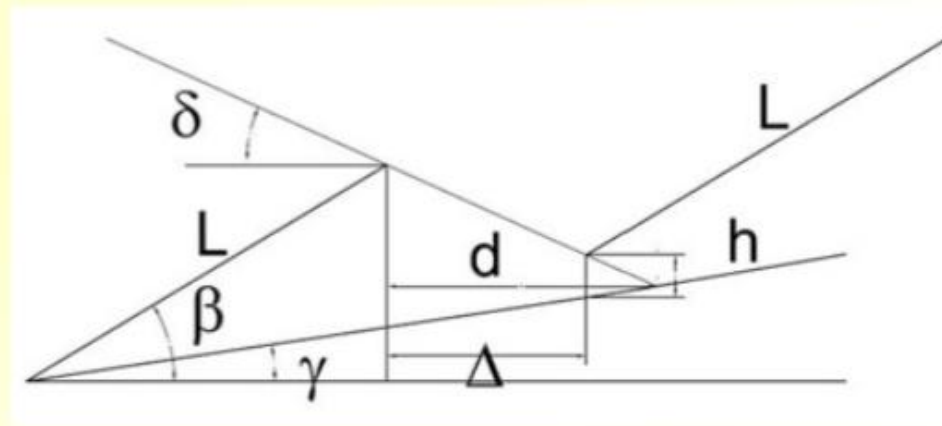
Gli impianti solari fotovoltaici

Disposizioni delle stringhe su piano inclinato

- L è la lunghezza del pannello
- d è la **distanza minima per evitare ombreggiamenti** al solstizio d'inverno del pannello successivo
- β è l'angolo di inclinazione del pannello rispetto all'orizzontale
- γ è l'angolo di inclinazione del terreno rispetto all'orizzontale
- δ è l'angolo di declinazione al solstizio d'inverno

- Δ è la **distanza massima possibile** inferiore a d
- h è il supporto aggiuntivo al sostegno del pannello successivo **per evitare ombreggiamenti** al solstizio d'inverno dal filare precedente

$$h = (d - \Delta) \cdot [\operatorname{tg}(\delta) + \operatorname{tg}(\gamma)]$$



Ovviamente, l'altezza h può ridursi nel caso di installazione dei pannelli a distanza maggiore di quella minima

L'innalzamento di un sostegno non sempre comporta la necessità di innalzamento del sostegno successivo, proprio in relazione alla **variazione di pendenza del terreno.**

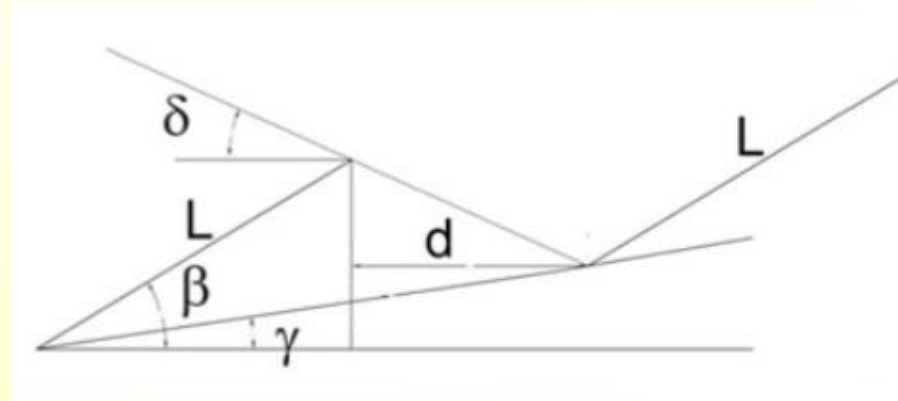
Gli impianti solari fotovoltaici

Disposizioni delle stringhe su terreno piano

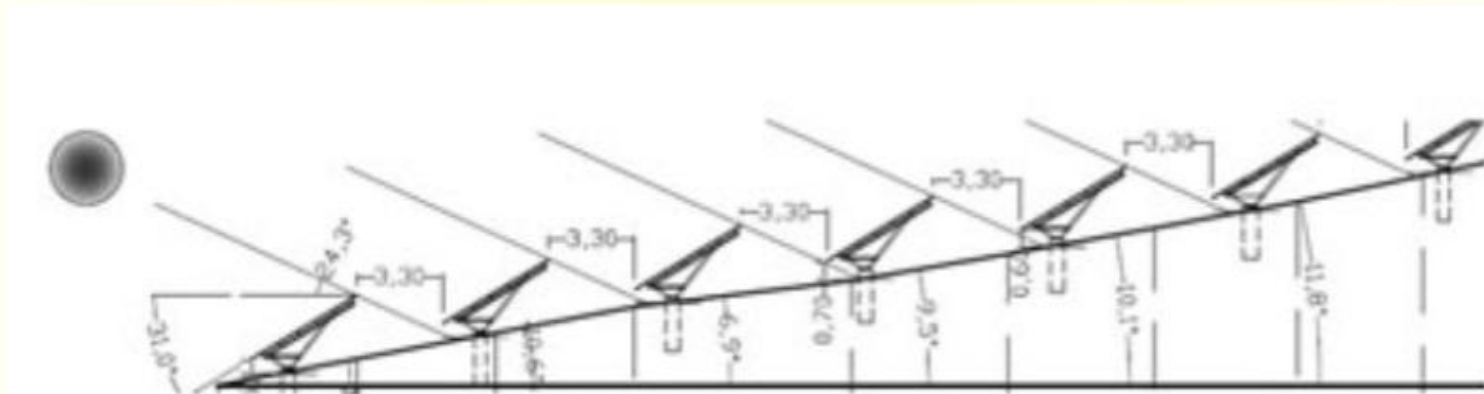
Nel caso di installazione su profilo piano ($\gamma=0$), le relazioni si semplificano nelle:

$$d = L \cdot \frac{\text{sen}(\beta)}{\tan(\delta)}$$

$$h = (d - \Delta) \cdot \tan(\delta)$$



E' possibile utilizzare appositi SW che proiettino i coni d'ombra su terreno al solstizio d'inverno



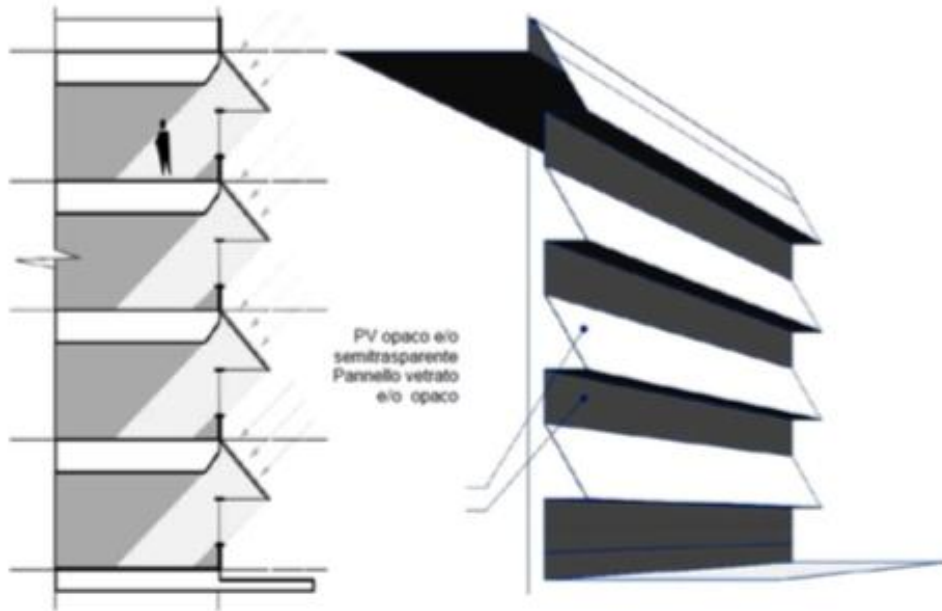
ROBERTO RICCIU Corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici A.A.

2020-21

FINE

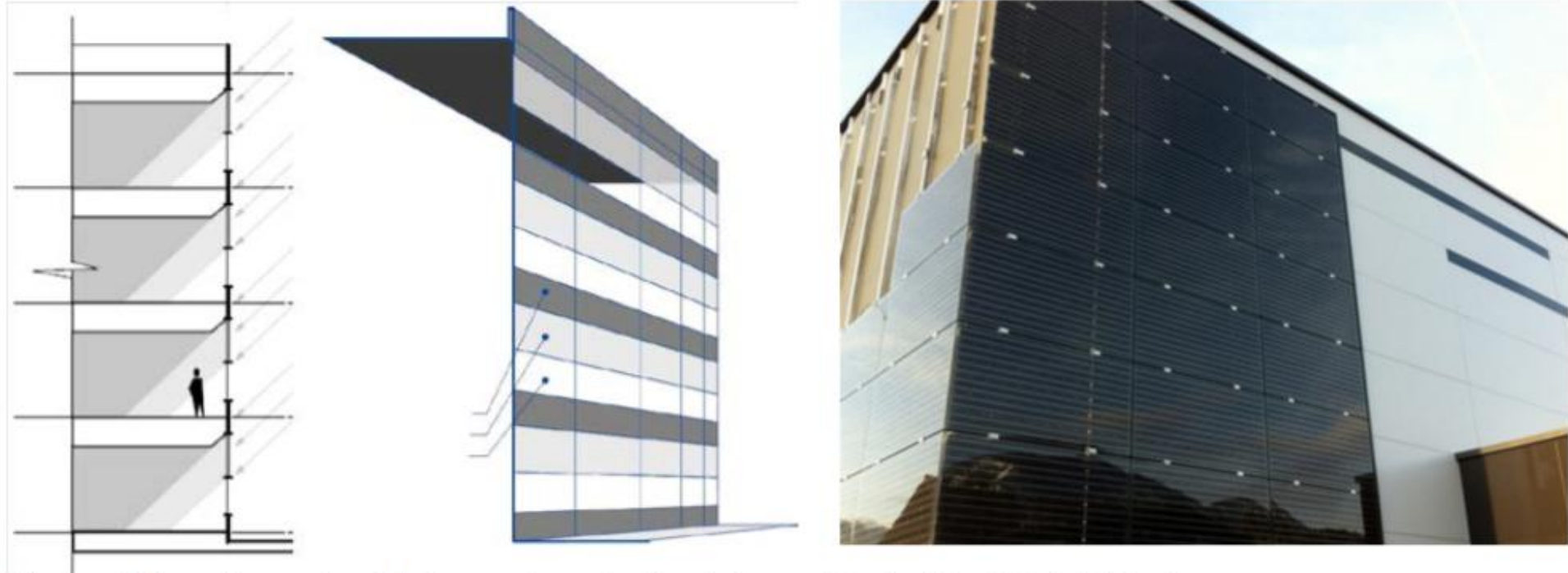
Gli impianti solari fotovoltaici

in edifici ex-novo sia in edifici già realizzati.



Esempio di moduli a risega in facciata: Kyocera Building, Tokyo

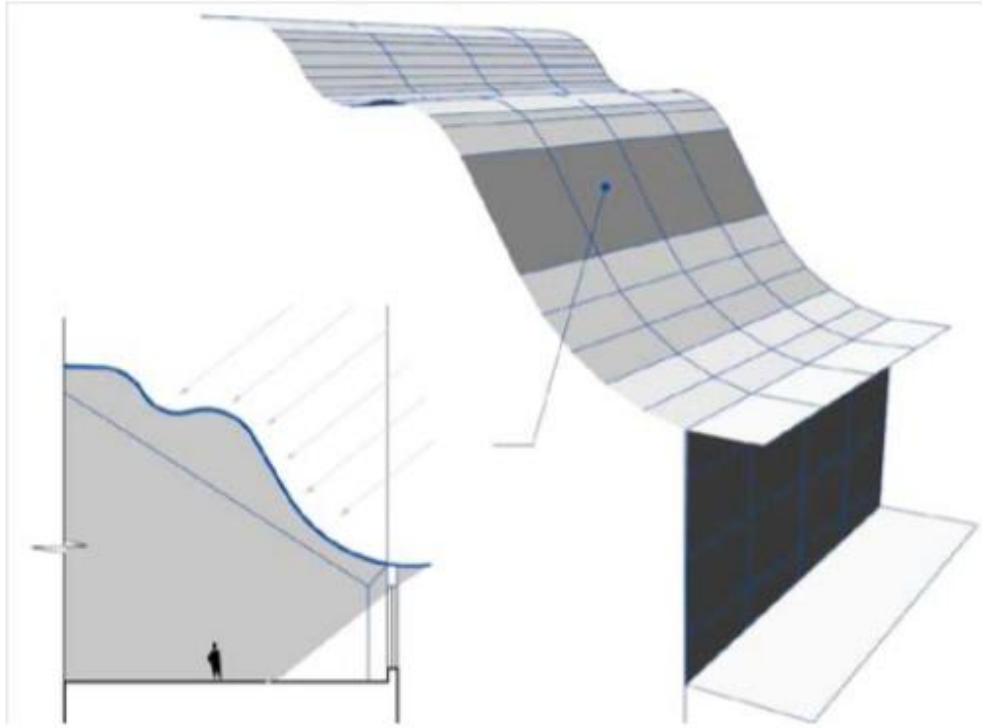
Gli impianti solari fotovoltaici



Esempio di integrazione in facciata verticale: Kirchbichl, Tirolo

(Fonte: <http://www.pvp.co.at/it/BIPV-esempi2012.php>)

Gli impianti solari fotovoltaici



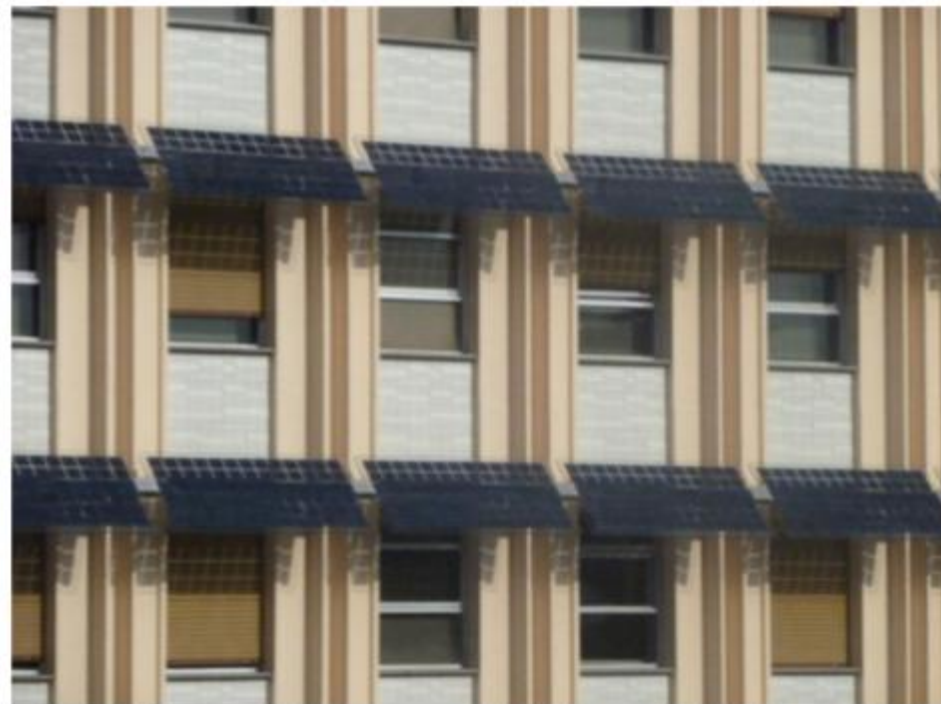
Esempio di integrazione su copertura curva: Messe Essen, Germania

(Fonte: <http://www.abakus-solar.us/power-solutions/pv-architecture>)

ROBERTO RICCIU Corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici A.A.

2020-21

Gli impianti solari fotovoltaici



Intervento retrofit a Bari prima e dopo il recupero

(Fonte: <http://www.domusweb.it/it/architettura/2011/02/18/forms-of-energy-9.html>)

Gli impianti solari fotovoltaici



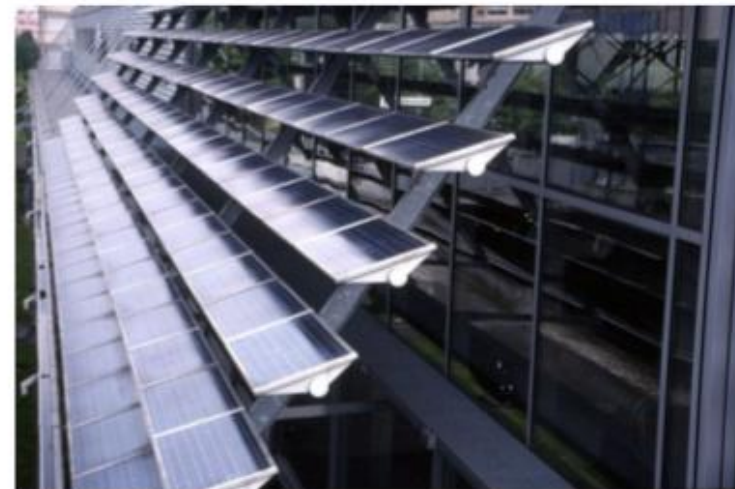
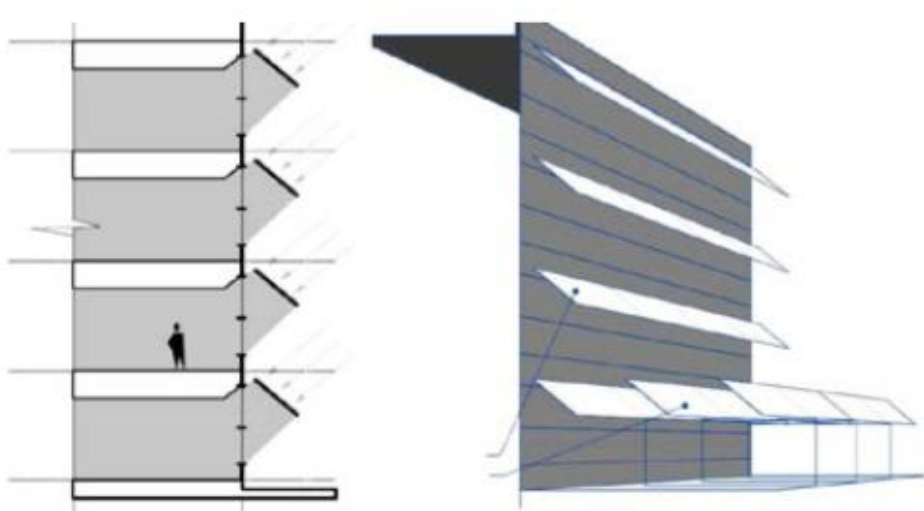
*Esempio di parapetto
fotovoltaico*

Gli impianti solari fotovoltaici



*Integrazione in frangisole a scorrimento,
Elementary school Hermagor, Austria
(Fonte:
<http://www.architekten-ronacher.at/de/projects/hermagor-elementary-school>)*

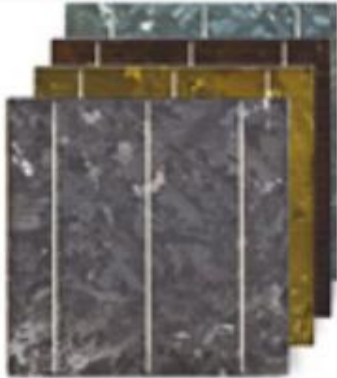
Gli impianti solari fotovoltaici



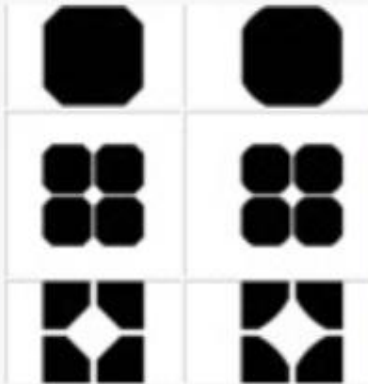
Esempio di integrazione su frangisole a ribalta

Gli impianti solari fotovoltaici

(Fonte: <http://www.bipv.ch>)



Colore



Motivi



Riflessione

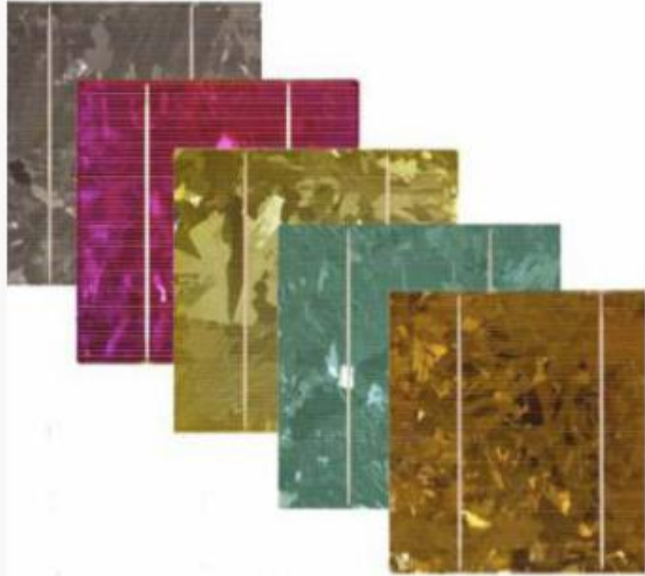


Trasparenza



Flessibilità

Gli impianti solari fotovoltaici



Celle colorate mc-Si



Celle colorate sc-Si

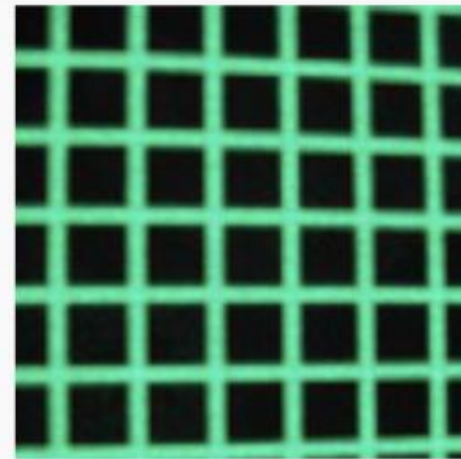
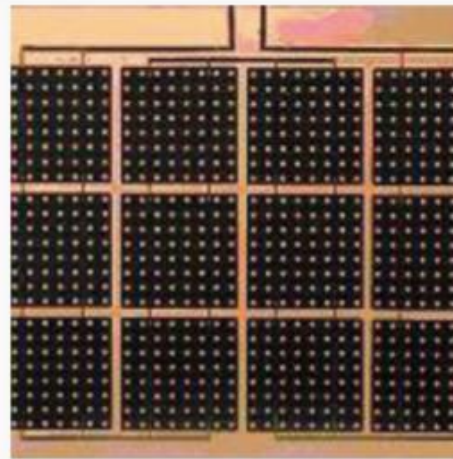
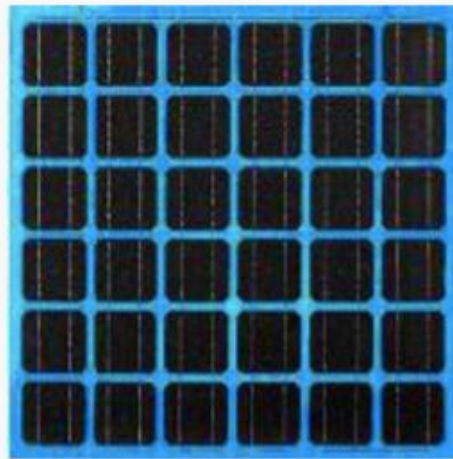
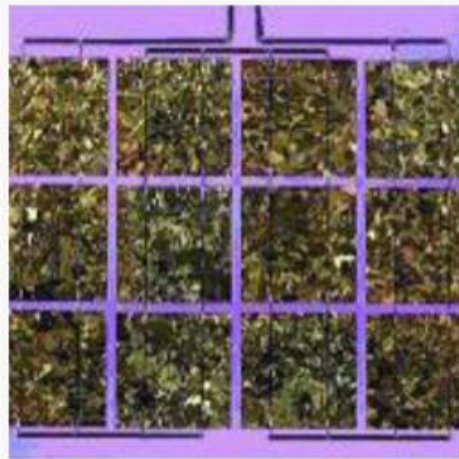


Celle a film sottile

Esempi di celle fotovoltaiche colorate. (Fonte: <http://www.bipv.ch>)

Gli impianti solari fotovoltaici

Esempi di alcuni prodotti offerti da diverse industrie. (Fonte: <http://www.bipv.ch>)





Impianto di produzione di celle a film sottile in silicio amorfo
(Fonte: <http://www.uni-solar.com>)

ROBERTO RICCIU Corso di Impianti per la
sostenibilità energetica degli edifici A.A.

2020-21



i

Tende fotovoltaiche in Power Plastic in alcuni uffici a Tamarac, Florida
(fonte: www.archithings.com)

ROBERTO RUCSU Corso di Ingegneri per la
sostenibilità energetica degli edifici A.A.

2020-21