

Sistemi Fotovoltaici



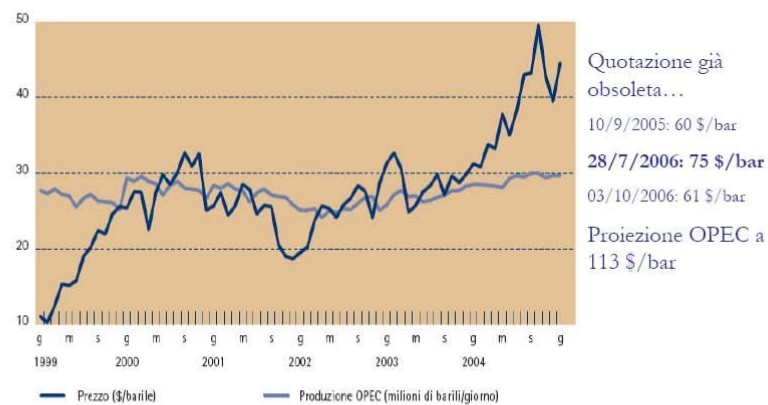
Nuoro 12 Giugno 2009



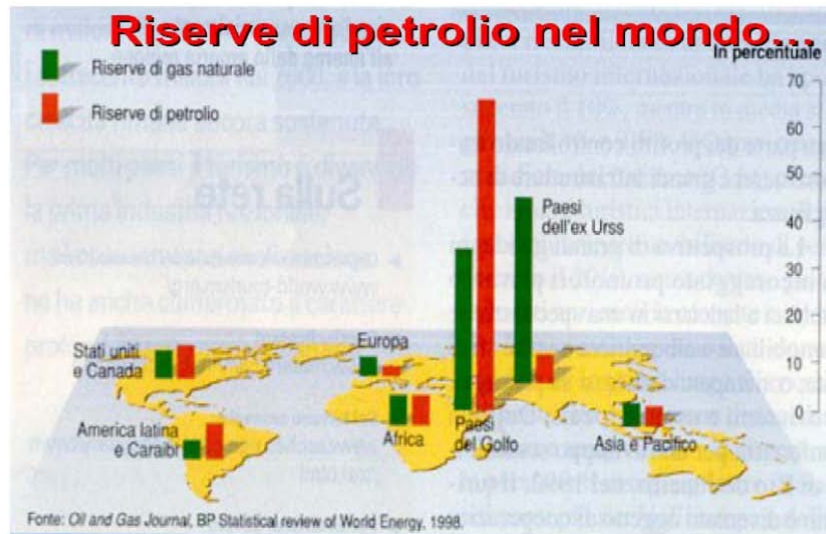
Dott . Ing. Stefano Floris

FONTI ENERGETICHE RINNOVABILI: FOTOVOLTAICO

FIG. 1.1 PREZZO DEL PANIERE E PRODUZIONE OPEC^(A) 1999-2004



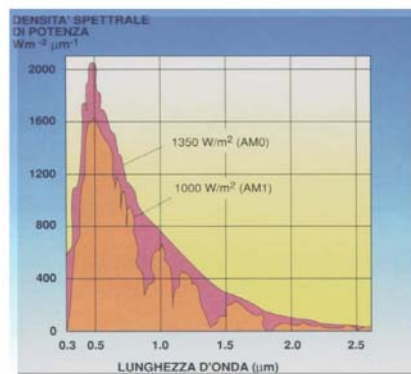
FONTI ENERGETICHE RINNOVABILI: FOTOVOLTAICO



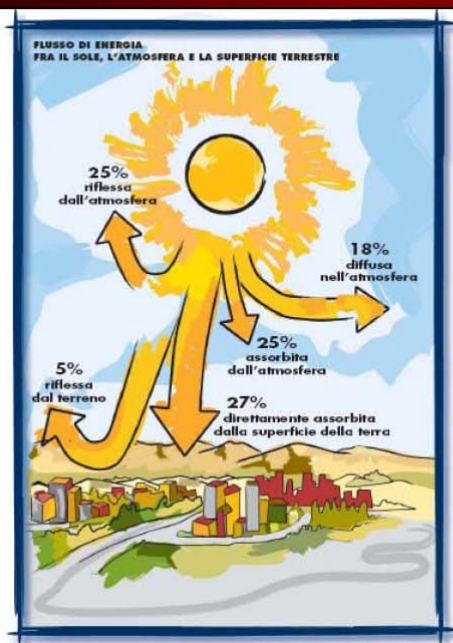
LA RADIAZIONE SOLARE

DEFINIZIONI

- La **radiazione solare** è l'energia elettromagnetica emessa dal sole.
- Densità di potenza **MASSIMA** fuori dell'atmosfera terrestre **1350 W/m²** (**costante solare**) sulla superficie terrestre **1000 W/m²**
- Lunghezza d'onda della radiazione solare da 0,3 a 2,5 micrometri
Picco massimo 0,5 μm



LA RADIAZIONE SOLARE



Come è composta la luce solare

- 25% Riflessa dall'atmosfera
- 18% Diffusa nell'atmosfera
- 25% Assorbita dall'atmosfera
- 5% Riflessa dal terreno
- 27% Direttamente assorbita dalla superficie della terra

LA RADIAZIONE SOLARE

DISPONIBILITA'

La radiazione solare raccolta al suolo dipende:

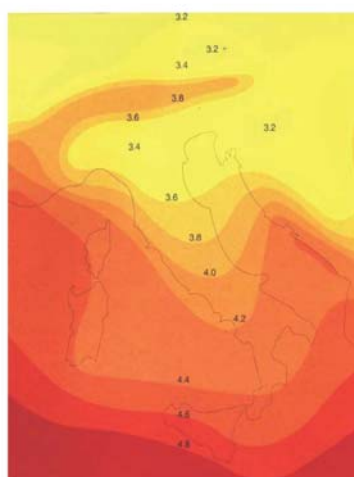
- dalle condizioni meteorologiche ed atmosferiche
- dall'angolo formato tra la radiazione incidente e la superficie al suolo

Disponibilità dati:

- norma UNI 10349
- mappe isoradiazione ENEA

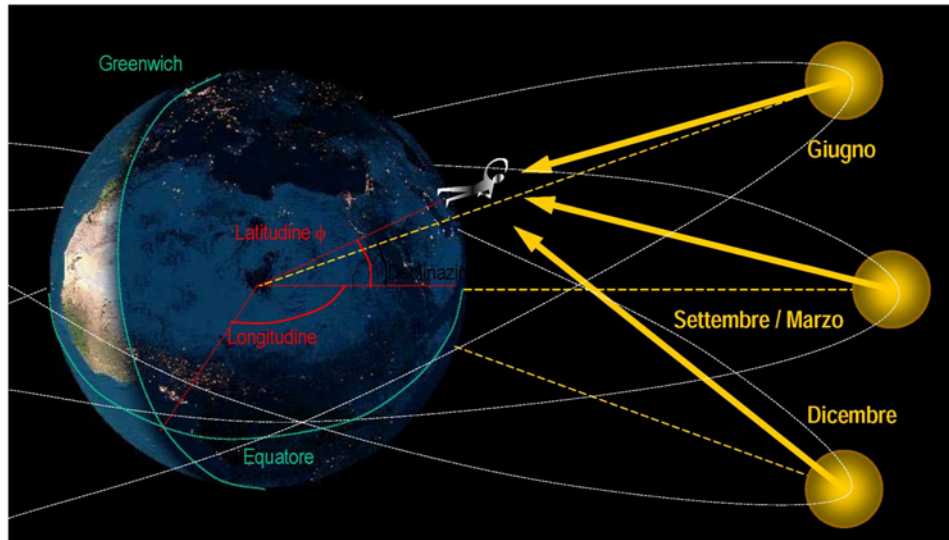
Determinazione della radiazione solare su una superficie inclinata:

- norma UNI 8477/1



Mappa isoradiazione per l'Italia
(valore giornaliero medio annuale in kWh/m²)

LA RADIAZIONE SOLARE



RADIAZIONE SU UN PIANO INCLINATO

θ angolo d'incidenza radiazione solare diretta
 θ_z angolo zenitale (tra raggio solare direzione verticale)

α_s angolo d'altezza solare (tra superficie orizzontale e raggio solare)

γ_s angolo azimutale solare (proiezione raggio solare su piano orizzontale con direzione sud)

Questi angoli si possono esprimere come opportune funzioni di:

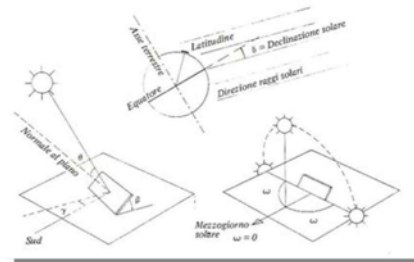
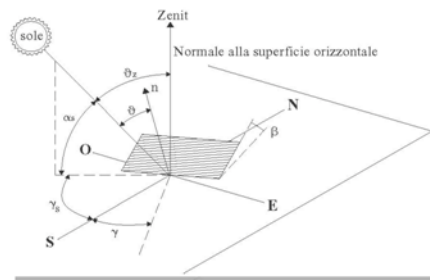
β angolo d'inclinazione superficie

γ angolo azimutale superficie (con direzione sud)

ω angolo orario (t tempo) = (t - 12) • 15°

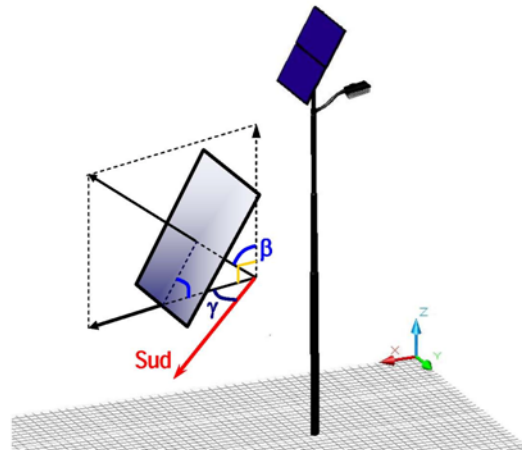
ϕ latitudine

δ angolo di declinazione



RADIAZIONE SU UN PIANO INCLINATO

Angoli di inclinaz. β e di orientaz. γ di una superficie



RADIAZIONE SU UN PIANO INCLINATO

L'irradianza totale media giornaliera sul piano inclinato si ottiene dalla UNI 8477/1 come:

$$\bar{H}_T = \bar{H}_{Th} \cdot \left[\left(1 - \frac{\bar{H}_{dh}}{\bar{H}_{Th}} \right) \cdot \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_{dh}}{\bar{H}_{Th}} \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right]$$

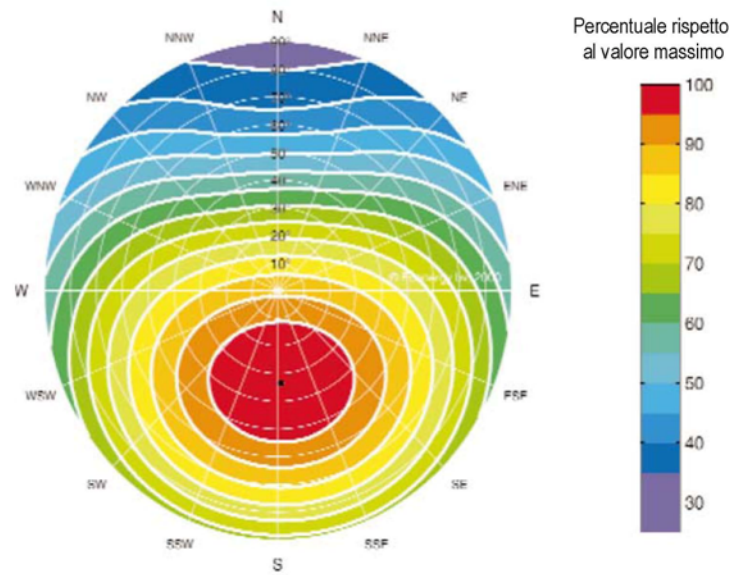
Dove:

$$\bar{R}_b = \frac{T(\omega'' - \omega') + U(\sin \omega'' - \sin \omega') - V(\cos \omega'' - \cos \omega')}{2(T_h \omega_s + U_h \omega_s)} \quad \bar{H}_{Th} = \bar{H}_{bh} + \bar{H}_{dh}$$

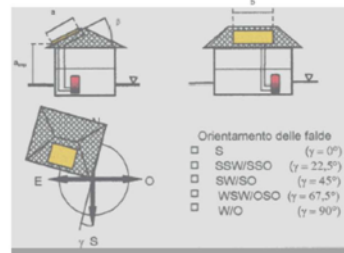
è il **fattore angolare** diretto medio giornaliero funzione degli angoli orari di alba e tramonto della superficie, w' e w'' , e delle funzioni :

$$\begin{aligned} T &= \sin \delta \cdot (\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) \\ U &= \cos \delta \cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \\ V &= \sin \beta \sin \gamma \\ T_h &= \sin \delta \sin \phi \\ U_h &= \cos \delta \cos \phi \end{aligned}$$

RADIAZIONE SOLARE GLOBALE ANNUA



INCLINAZIONE E ORIENTAMENTO



orientamento	angolo di inclinazione						
Sud: 0° Est/Ovest: 90°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0	0.89	0.97	1	0.99	0.93	0.83	0.69
15	0.89	0.96	1	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	0.9	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

IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Vantaggi

indipendente dal sito
 nessun consumo di combustibile
 nessuna emissione inquinante
 nessun emissione acustica
 totale modularità (da 1W ai megawatt)
 tecnologia ingegneristica semplice
 vita utile e garantita di più di 20 anni
 ideale per l'ambiente urbano

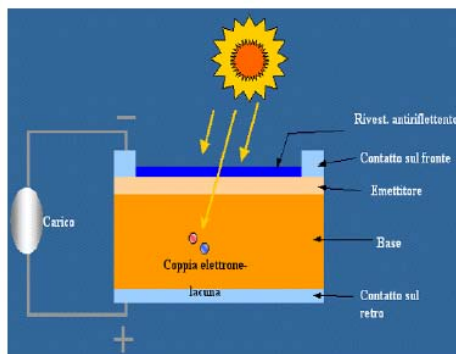
Difetti

bassa efficienza
 costo elevato
 evoluzione tecnologica lenta (laboratorio-produzione: 15 anni)



LA CELLA FOTOVOLTAICA - PRINCIPI

Cos'è l'effetto fotovoltaico



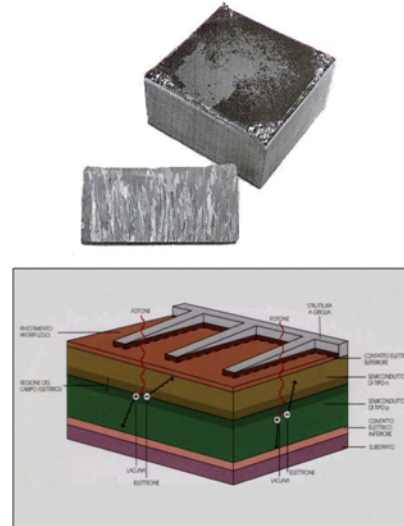
- Nel 1839 Henri Becquerel scoprì che la luce interagendo con alcune sostanze chimiche produceva corrente elettrica
- Nel 1954 fu realizzata la prima cella solare con un'efficienza del 6 % destinata ad applicazioni spaziali

LA CELLA FOTOVOLTAICA - PRINCIPI

Un fotone, dotato di sufficiente energia, è assorbito nella cella, creando una coppia di cariche elettriche di segno opposto, chiamate “*elettrone*” e “*lacuna*”.

Per generare effettivamente la corrente elettrica, però, è necessaria una differenza di potenziale che faccia muovere le cariche, e questa viene creata grazie all'introduzione di piccole quantità di impurezze, chiamate “*droganti*”, nel materiale che costituisce le celle, che sono in grado di modificare profondamente le proprietà elettriche del semiconduttore.

Per il **silicio**, drogato con **fosforo**, si ottiene la formazione di **silicio di tipo “n”** caratterizzato dal fatto di possedere una densità di elettroni liberi (cariche **negative**) molto più alta che quella presente nel silicio normale. Il drogaggio del **silicio con** atomi di **boro** porta al **silicio di tipo “p”** in cui le cariche libere in eccesso sulla norma sono di segno **positivo**.



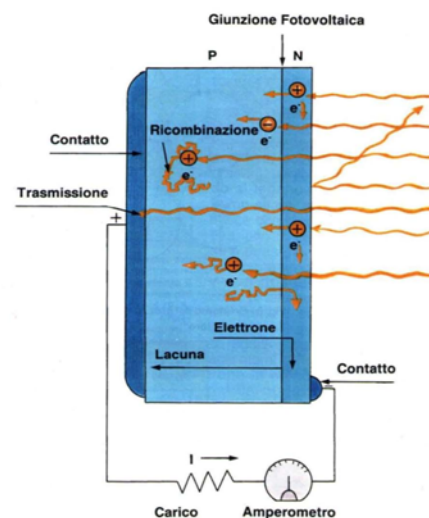
LA CELLA FOTOVOLTAICA - PRINCIPI

Nella zona di contatto tra il silicio di tipo n e il silicio di tipo p, detta “*giunzione n-p*”, si ha la formazione di un **forte campo elettrico, capace di muovere in direzioni opposte le cariche elettriche positive e negative** generate dalla luce nelle vicinanze della giunzione.

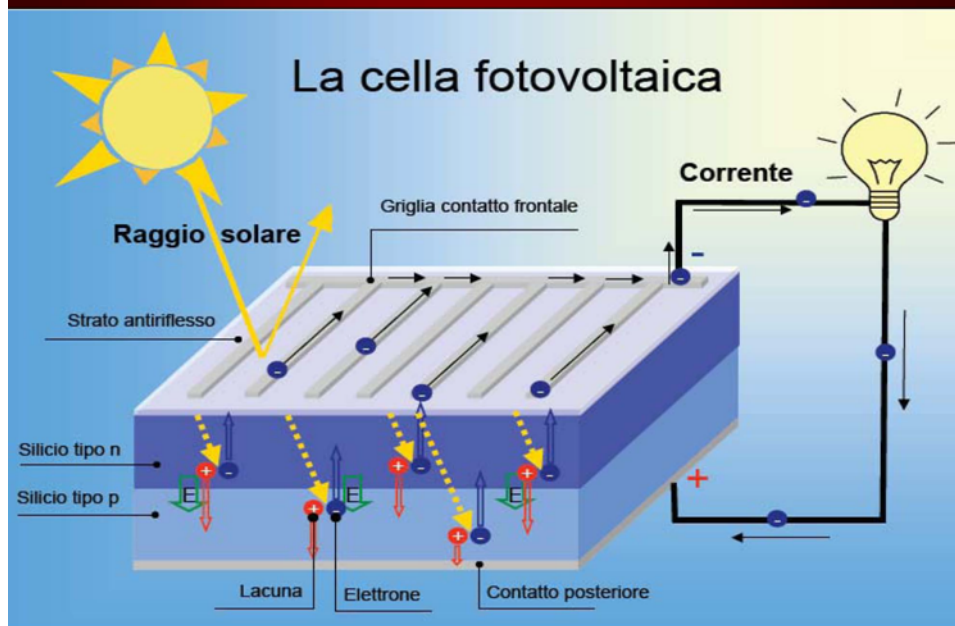
In questo modo, le cariche vengono separate e, se si collega questo dispositivo ad un circuito esterno, si potrà avere una circolazione di corrente: **tanto maggiore è la quantità di luce incidente, tanto maggiore è la corrente generata.**

Nella tipica cella fotovoltaica (vedi figura) si distinguono due strati semiconduttori:

- uno strato superiore, esposto alla radiazione solare, molto sottile di tipo n
- un secondo strato di tipo p in cui avviene l'assorbimento della luce incidente.

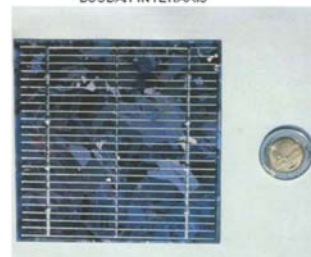
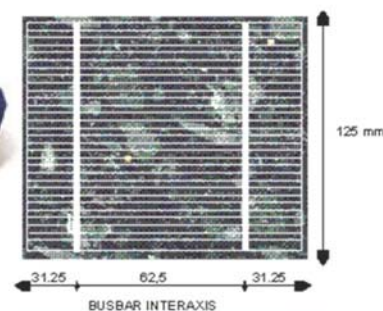


LA CELLA FOTOVOLTAICA - PRINCIPI



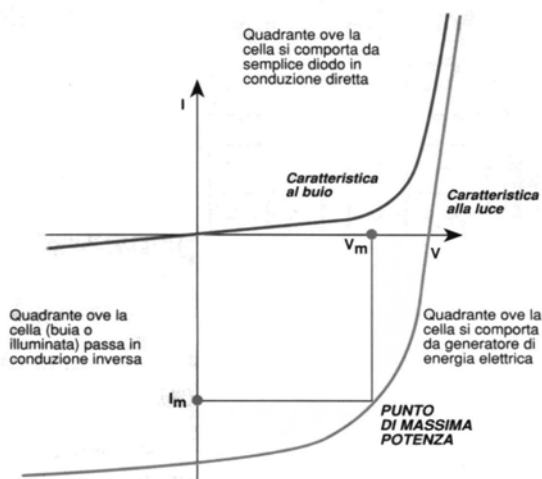
LA CELLA FOTOVOLTAICA

- Caratteristiche costruttive di una tipica cella fotovoltaica
 - spessore pari circa a 0,3 mm
 - forma circolare o quadrata
 - area pari circa a 100 cm²
- Per essere utilizzati ai fini del processo di conversione i fotoni di cui è composta la luce solare, devono possedere un'energia superiore ad un livello minimo
- Per il silicio la parte di radiazione avente lunghezza d'onda superiore ad 1,1 micrometri non viene assorbita



TENSIONE - CORRENTE

- La cella solare, esposta alla radiazione solare, si comporta come un generatore di corrente il cui funzionamento viene descritto mediante la **caratteristica tensione-corrente**



POTENZA NOMINALE O DI PICCO

La potenza è data dalla:

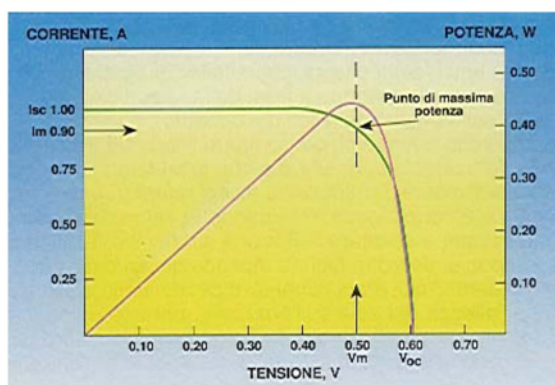
$$P = V \times I$$

in cui:

P è la potenza erogata dalla cella [W];

V è la differenza di potenziale [V];

I è l'intensità della corrente [A].



La **potenza massima** estraibile dalla cella in condizioni di irradianza e temperatura specificate,

(temperatura alla giunzione di 25°C, irradianza di 1000 W/m², spettro della radiazione solare pari a quello riscontrabile in condizioni di AM(air mass) 1,5)

STC (Standard Test Condition), viene definita essere la **Potenza Nominale (W_N) o di Picco (W_p)**.

RENDIMENTO DI UNA CELLA

$$\eta = \frac{\text{potenza massima erogabile (in condizioni standard)}}{\text{potenza della radiazione incidente sulla superficie della cella}}$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{1000 \times A_{\text{cella}}}$$

- celle commerciali al silicio $\eta = 11\% \div 16\%$
- celle di laboratorio $\eta \cong 30\%$

Cause di inefficienza di una cella fotovoltaica:

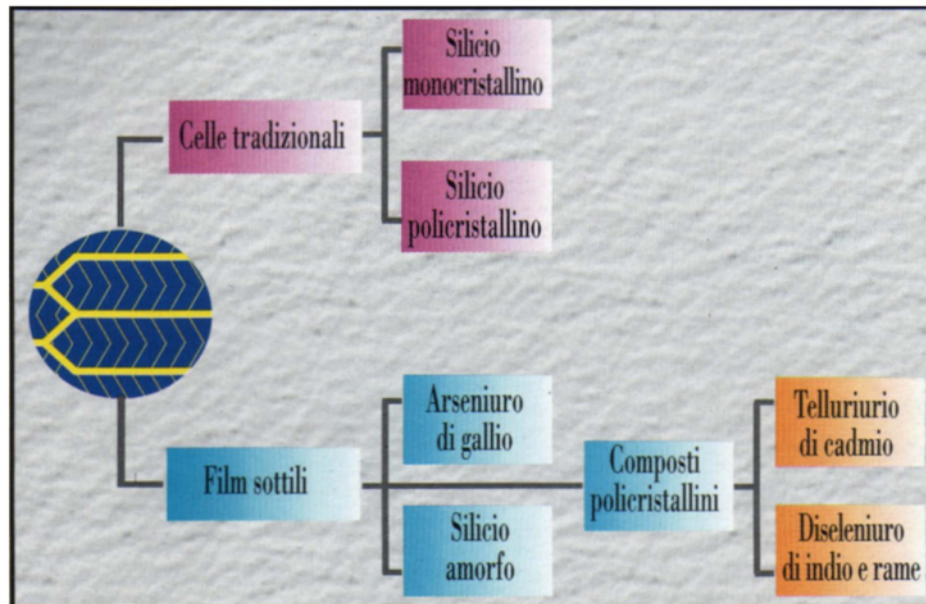
- inefficienza di penetrazione dei fotoni all'interno della cella
- inefficienza di conversione dell'energia dei fotoni in energia della coppia elettrone-lacuna
- inefficienza di conversione dell'energia posseduta dalle coppie elettrone-lacuna in energia elettrica
- inefficienza di trasferimento al carico dell'energia fotoelettrica prodotta

FATTORI CARATTERIZZANTI UNA CELLA

Le caratteristiche prestazionali di una cella, nell'esempio al **silicio monocristallino**, posta **nelle condizioni di riferimento, STC**, sono quindi fornite dai seguenti parametri :

- - efficienza $\eta = 15\%$
- - corrente generata: 2,5-3 A
- - voltaggio: 0,45-0,55 V
- - potenza erogata: 1,5 W
- - fattore di riempimento FF: 0,6 –0,8

TIPOLOGIA CELLE FOTOVOLTAICHE

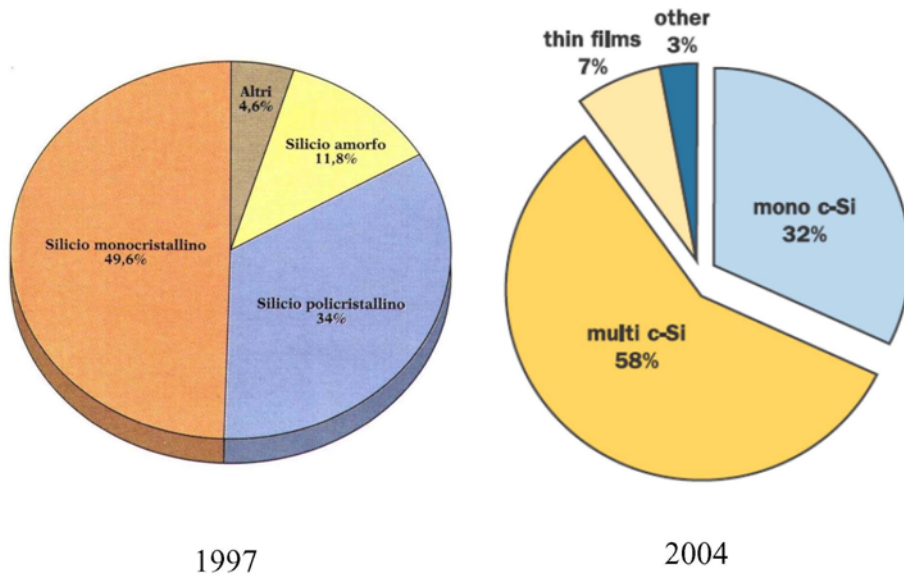


TIPOLOGIE CELLE FOTOVOLTAICHE

- Silicio Amorfo
- Silicio Monocristallino
- Silicio Policristallino
- Arseniuro di Gallio et al.

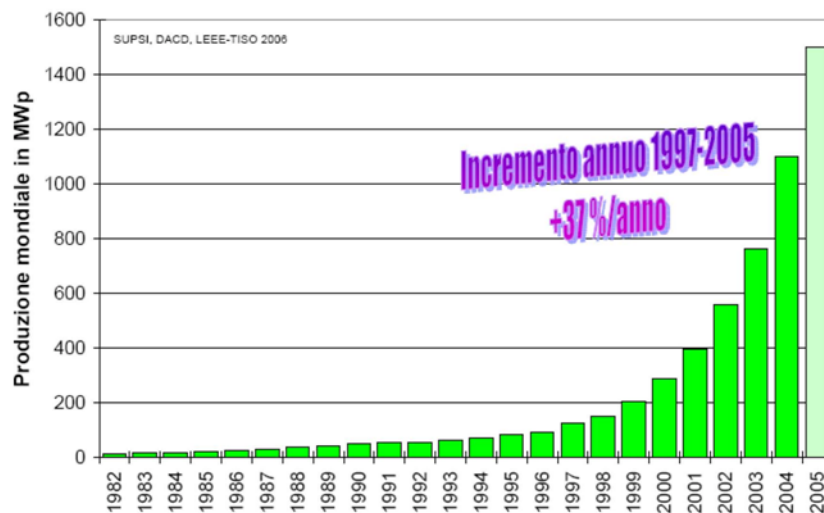


PRODUZIONE CELLE



PRODUZIONE CELLE

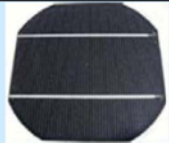
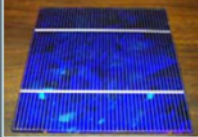
Produzione mondiale di moduli PV, in MWp



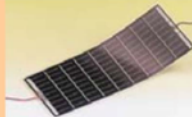
TIPOLOGIA CELLE FOTOVOLTAICHE

Le 3 principali tecnologie sul mercato FV

Tecnologia **cristallina**

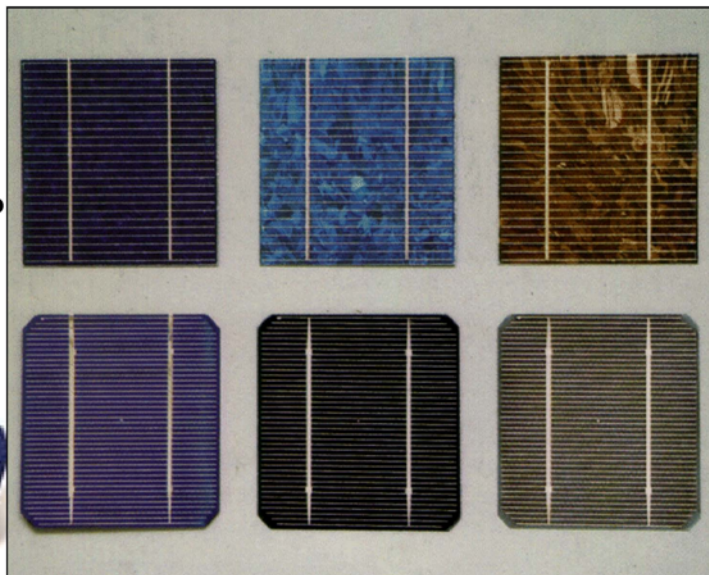
Silicio monocristallino	Single crystal Si	sc-Si (m-Si)	
Silicio policristallino	Multi crystal Si	mc-Si (p-Si)	

Tecnologia **film sottile**

Silicio amorfo	Amorphous Si	a-Si	
--------------------------	-----------------	------	--

TIPOLOGIA CELLE FOTOVOLTAICHE

Celle
al silicio
mono e
policristallino



TIPOLOGIA CELLE FOTOVOLTAICHE

Cella in silicio monocristallino

- Materiale ad un elevato grado di purezza
- Maggiore efficienza rispetto alle altre tipologie di celle al silicio
- Generalmente di forma pseudo-quadra

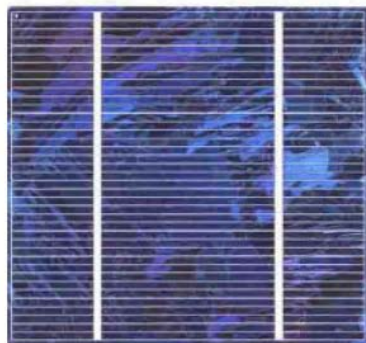


Efficienza massima 21.5 %

TIPOLOGIA CELLE FOTOVOLTAICHE

Cella in silicio policristallino

- Meno complesse da realizzare rispetto a quelle in monocristallino
- Rendimento di poco inferiore alle precedenti



Efficienza massima 19 %

TIPOLOGIA CELLE FOTOVOLTAICHE

Cella in silicio amorfo

- Flessibili: possono essere “ripiegati”... ma tendono a degradarsi più in fretta
- Rendimento inferiore alle precedenti perché struttura molecolare indefinita

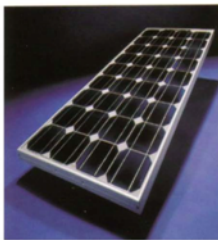


Efficienza massima 7-8%

I PRODOTTI FOTOVOLTAICI COMMERCIALI (ESEMPI)

Le tipologie in commercio

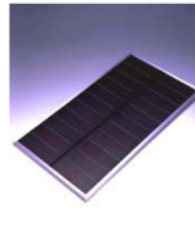
Cristallino con cornice



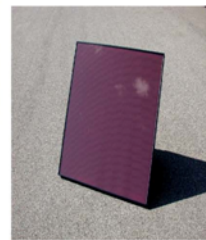
Cristallino senza cornice



Amorfo con cornice

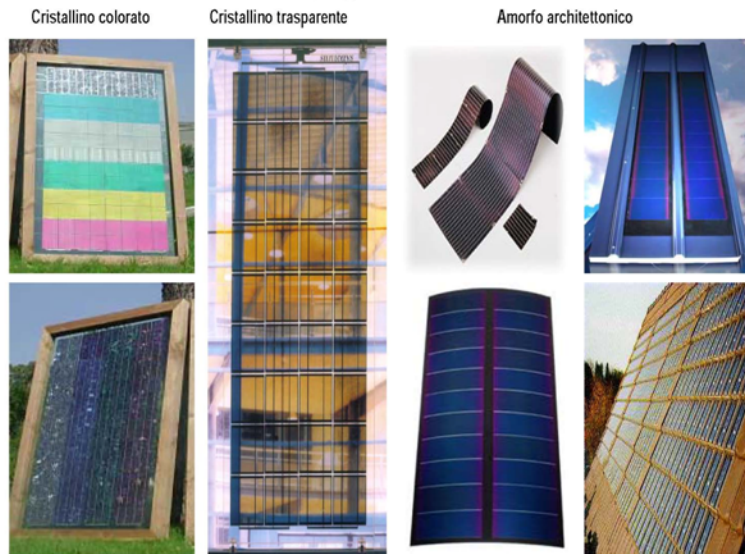


Amorfo senza cornice



I PRODOTTI FOTOVOLTAICI COMMERCIALI (ESEMPI)

Le tipologie custom-made



CONFRONTO

Confronto tra tecnologie ^(1/2)

Tecnologia	m-Si	p-Si	a-Si
η cella tipico	13 – 16 %	11 – 13 %	4 – 6 % 7 – 10 %
Vantaggi	- η elevato - η stabile - tecnologia affidabile	- costo - meno delicati (hot spot) - miglior occupazione	- costo - fabbricazione - meno materiale - buon η a G ↓ e luce art. - flessibile - coeff. Voc. f(T)
Svantaggi	- costo - E grigia - quantità materiale - complesso	- complesso - sensibile alle impurità	- η basso, che scende - degrado iniziale

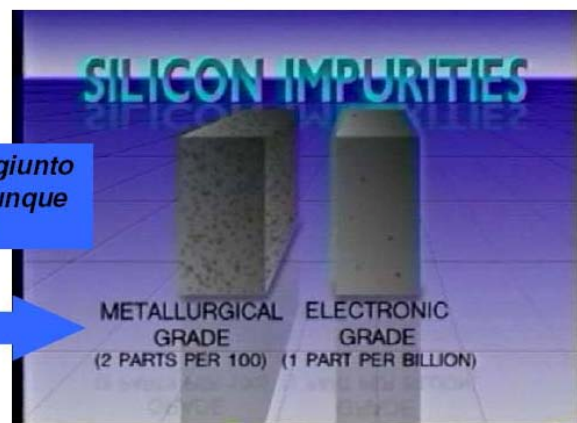
CONFRONTO

Confronto tra tecnologie (2/2)

Tecnologia	GaAs arseniuro di Gallio	CdTe Tellurio di cadmio	CdS/CuS solfuro di cadmio e di rame	CuIn Sez. seleniuro di rame e di indio (EnS)
η cella tipico	22 % (labo)	10 %	5 %	12 % (labo)
vantaggi	- resiste a Televate - concentr.	- gap ideale	- fabbri- cazione	- molto stabile
svantaggi	- tossicità - disp. di materiale	- tossicità - disp. di materiale	- tossicità - sensibile all'umidità	- tossicità (Cd)

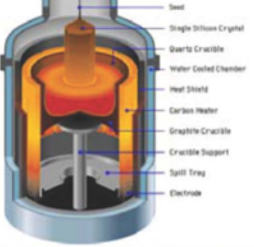
FABBRICAZIONE BARRE DI SILICIO

Grado di purezza raggiunto
normalmente in qualunque
industria di materiali

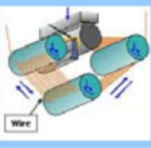
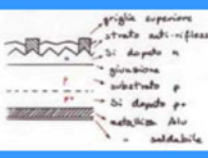


La purezza del materiale che si deve avere in campo elettronico è almeno **7 ordini di grandezza** migliore di quella necessaria in altri settori industriali

FABBRICAZIONE BARRE DI SILICIO (m-Si)

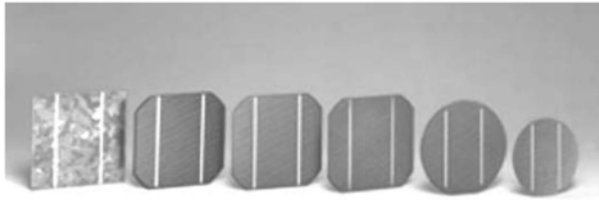
<u>Estrazione</u>	<u>Riduzione</u>	<u>Purificazione</u>	<u>Cristallizzazione</u>
			
SiO_2 (sabbia di quarzo)	$\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$ (silicio metallurgico)	$(\text{Si} + 3\text{HCl} \leftrightarrow \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2)$ Triclorosilane ↓ Distillazione	Metodo Czochralski 
purezza: -	purezza: 98-99 %	purezza: 99.999 %	lingotto di silicio

FABBRICAZIONE DELLA CELLA

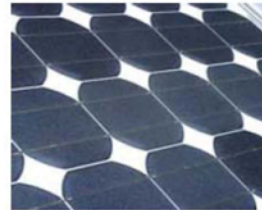
Fase:	Squadratura	Taglio	Drogaggio Deposito chimico Metalizzazione
Operazione:	Taglio con lama diamantata 	Taglio 	
Risultato:	Barra di silicio	« wafers » 	Cella m-Si 

- Formate a partire dal silicio cristallino
- Spessore wafers: 250-350 μm
- 130-180 μm : limite robustezza
- Proc. richiede molta E (Temp: 400-900 °C)

CARATTERISTICHE FISICHE



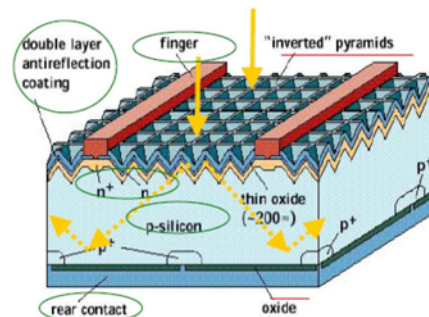
- Le **misure** più comuni sono:
10 x 10 cm 12,5 x 12,5 cm 15 x 15 cm
- Le **forme** più comuni sono:
quadrate, quadrate con smussatura
sugli angoli, circolari
- Lo **spessore** tipico è compreso
tra 0.25 e 0.35 mm
- La **potenza** tipica è di ca. 1,5 Watt



CELLE AD ALTA EFFICIENZA

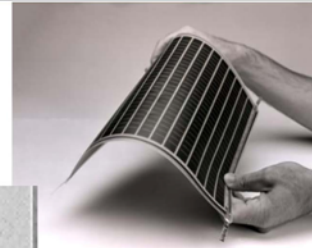
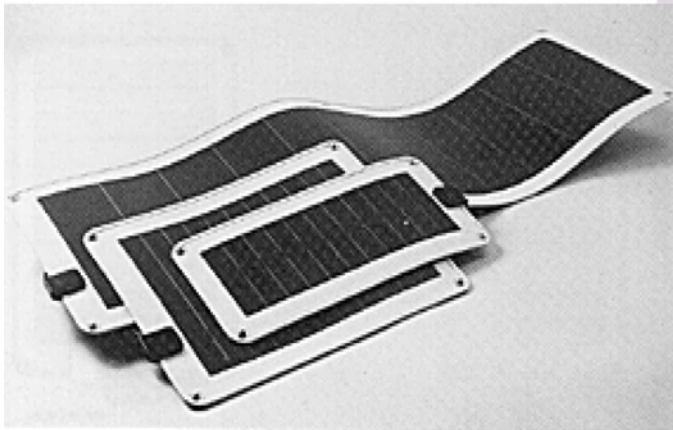
Struttura piramidale (fronte della cella)
 Strato riflettente (retro della cella)
 Assorbenza e Riflettanza ↑

=> ↑ efficienza cella FV



TIPOLOGIA CELLE FOTOVOLTAICHE

Celle al silicio amorfo – film sottile

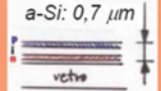
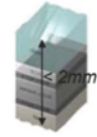


THIN FILM

- a-Si silicio amorfo
- CIS diseleniuro di indio e di rame
- CdTe telluro di cadmio



FABBRICAZIONE CELLA FILM SOTTILE

Fase:	Metallizzazione superiore	Deposito a-Si	Metallizzazione inferiore
Operazione:	Deposito conduttori trasparenti ($0.7 \mu\text{m}$) su substrato p.e. vetro (1.6 mm)	Deposito struttura p-i-n (deposizione al plasma: SiH_4)	Deposito metallizzazione inferiore (Ag)
Risultato:	TCO 	a-Si: $0.7 \mu\text{m}$ 	Cella a-Si 

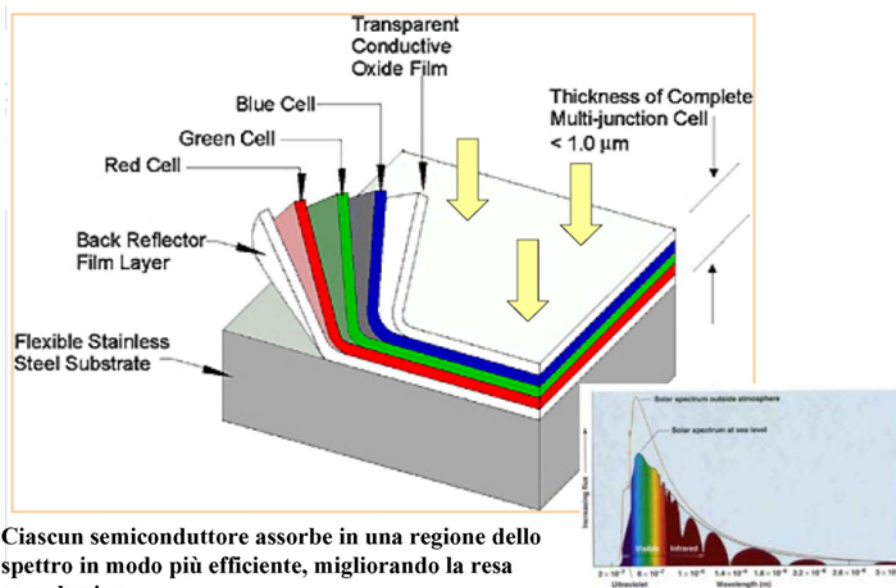
Formate a partire dal silicio gassoso (silano)

Basta $1 \mu\text{m}$ per captare tutto lo spettro

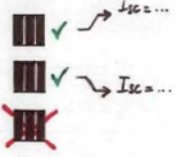
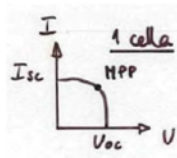
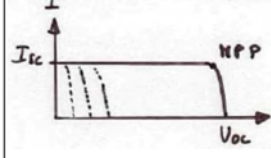
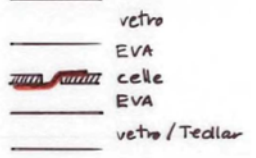
Costi di produzione contenuti (basso consumo di mat.)

Possibile realizzare strutture a giunzione multipla

STRUTTURA A GIUNZIONE MULTIPLA

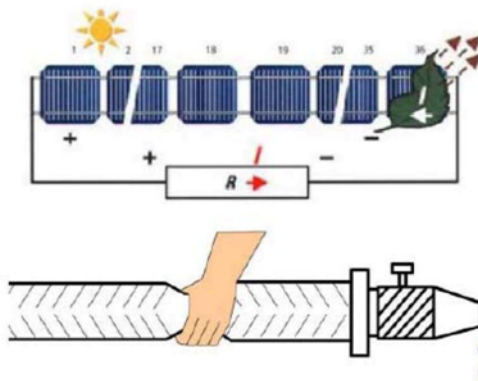


FABBRICAZIONE DEI MODULI

Test e triage celle	Collegamento in serie delle celle	Connessioni elettriche e Assemblaggio
 - controllo ottico - test foto-elettrico - misura I_{sc} 	 messa in serie di celle con I_{sc} uguale 	 EVA = etilvinilacetato (diventa trasparente tramite polimerizzazione) 

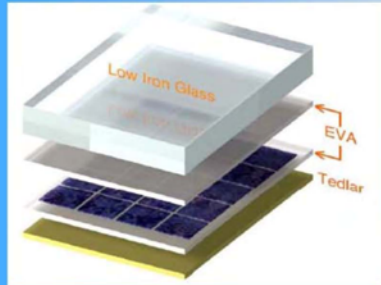
COLLEGAMENTO IN SERIE DELLE CELLE

La cella meno efficiente
limita tutte le altre !



Mismatch:
 $P_{\max \text{ modulo}} < \sum P_{\max \text{ celle}}$

FABBRICAZIONE DEI MODULI

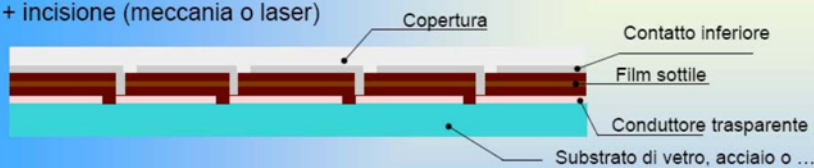
Moduli cristallini
sandwich FV (c-Si)

- Sigillante: fissaggio celle al vetro di copertura e alla chiusura posteriore
- Processo di laminazione: 150 °C, sigillatura dei componenti
- Protezione dagli agenti atmosferici (grandine, pioggia, umidità)
- Tenuta meccanica (vento, dilatazioni termiche, ...)
- Essenziali per garantire una durata di vita elevata dei moduli

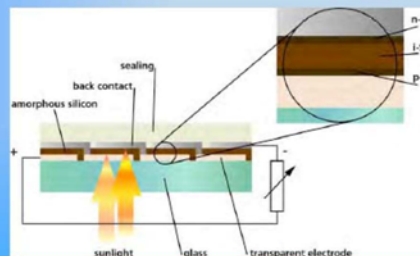
FABBRICAZIONE DEI MODULI

Fabbricazione di moduli FV:
I film sottili

> Deposizione
+ incisione (meccanica o laser)

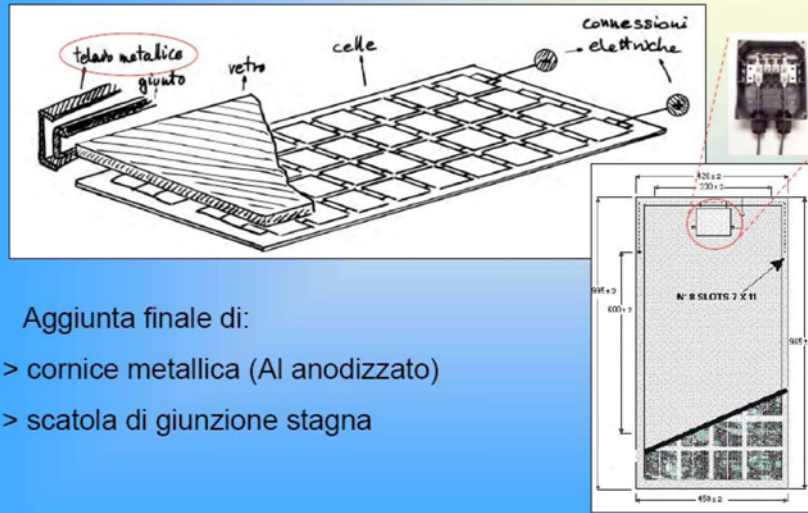


Modulo Thin Film:
collegamento
in serie di singole
celle longitudinali



FABBRICAZIONE DEI MODULI

Moduli cristallini



Aggiunta finale di:

- > cornice metallica (Al anodizzato)
- > scatola di giunzione stagna

CARATTERISTICHE FISICHE

moduli cristallini

Tedlar / EVA / Vetro



Modulo laminato (senza cornice)

Condizioni limite di utilizzo tipiche
(specificate dal produttore per ogni tipologia):

- > T_{amb} dove il modulo può operare: $-40 / +50\text{ }^{\circ}\text{C}$
- > Escursione termica sopportata: $-40 / +90\text{ }^{\circ}\text{C}$
- > Carico massimo distribuito applicabile: 5.400 Pa
- > Umidità relativa dell'aria: 0 – 100 %
- > Resistenza alla grandine: 25 mm diametro, 23 m/s

CARATTERISTICHE FISICHE

Moduli semitrasparenti



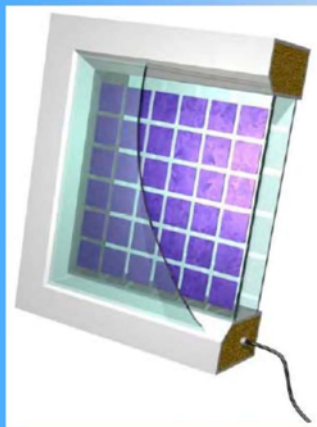
Vetro / EVA / Vetro

Celle semitrasparenti



CARATTERISTICHE FISICHE

Modulo semitrasparente incorporato in
finestra a doppio vetro



Caratteristiche:

- Isolamento termico
- Filtraggio di luce

Applicazioni:

- Facciate sud
- Tetti

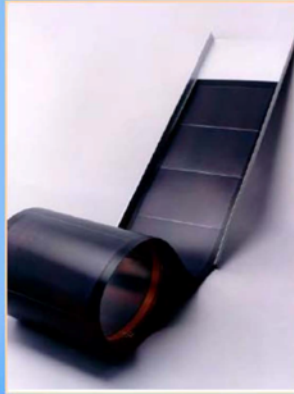
CARATTERISTICHE FISICHE

Moduli *thin film*

Senza vetro



Substrato: acciaio
Copertura: polimero
(non vetro)

Flessibile

Semitrasparente



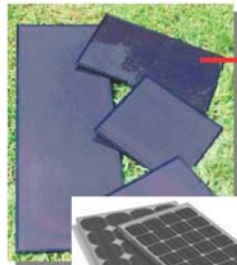
Substrato: vetro
Copertura: vetro

CARATTERISTICHE FISICHE



*Moduli al silicio
amorfo flessibili*

*Moduli al silicio
multicristallino*

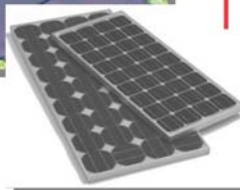


*Moduli al silicio
amorfo rigidi*

*Moduli al silicio
multicristallino
portatili*



*Moduli al silicio
monocristallino*



Tegole solari

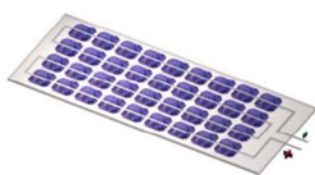


CARATTERISTICHE FISICHE

Moduli fotovoltaici



CARATTERISTICHE FISICHE


**Primi moduli
(per sistemi autonomi)**

36 celle in serie (4x9 o 3x12)
40-50 Watt
0.5 m²

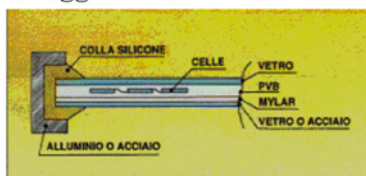
I moduli oggi :

1. Minimoduli o tegole solari (2-12 celle / 2-50 Watt)
2. Tradizionali allacciati alla rete (100-200 Watt)
(no. celle: multipli di 36)
3. Per facciate (100-300 Watt)
(no. celle: variabile, secondo caratteristiche facciata)

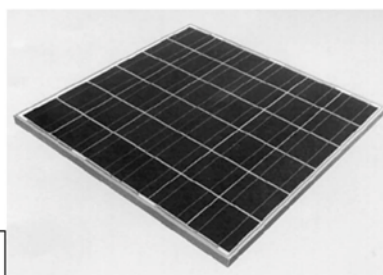
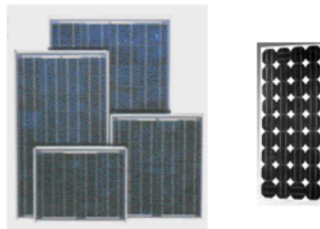


MODULO FOTOVOLTAICO

- Le celle fotovoltaiche vengono commercializzate sotto forma di **moduli** fotovoltaici.
- I moduli sono costituiti da una cornice (generalmente in alluminio anodizzato) coperta da uno strato di vetro con particolari caratteristiche in termini di resistenza meccanica, trasparenza ed antiriflessione, all'interno della quale trovano alloggio le celle.



Le celle possono essere collegate in serie o serie-parallelo, in modo da ottenere il voltaggio desiderato.

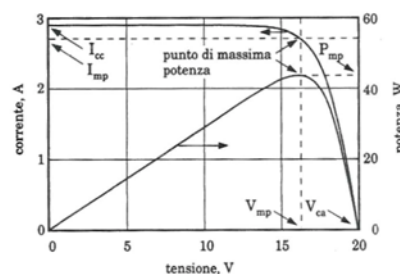
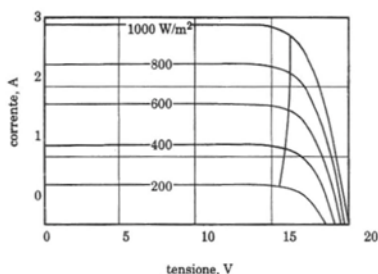


MODULO FOTOVOLTAICO

Caratteristiche del modulo fotovoltaico - struttura tipica:

- 36 celle disposte su 4 file parallele e collegate in serie
- potenza erogata circa $40 \div 50$ W
- tensione di lavoro ai morsetti circa 17 V

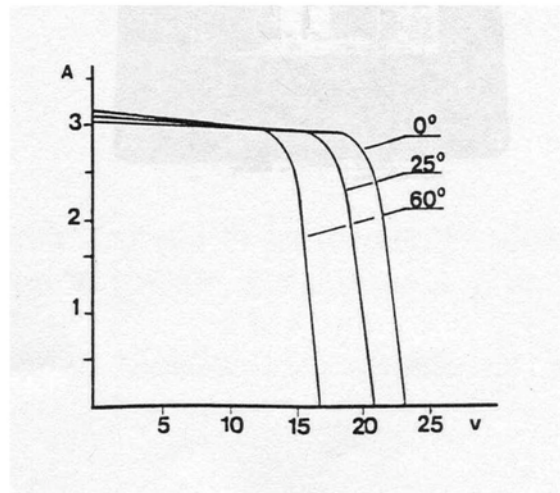
efficienza di conversione pari al $12\% \div 13\%$



curva caratteristica del modulo (silicio monocristallino)

MODULO FOTOVOLTAICO

Variazione della caratteristica con la temperatura del modulo



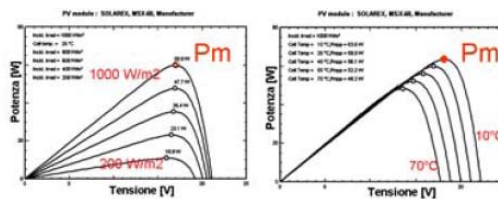
MODULO FOTOVOLTAICO

Fattori che influenzano il funzionamento di un modulo FV

Irraggiamento
Temperatura
Area

Spettro della radiazione solare
Angolo d'incidenza, riflessioni

...



MODULO FOTOVOLTAICO

Caratteristiche elettriche di un modulo

PHOTOVOLTAIC MODULE

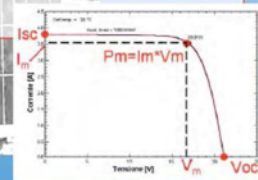
Electrical Specifications
(at 100 mW/cm², 25°C, AM 1,5)

Peak Power	80	WP
Short Circuit Current	5,40	Amps
Open Circuit Voltage	20,9	Volts
Voltage at Max Power	17,0	Volts
Current at Max Power	4,70	Amps
Noct	43	°C

Dimensions mm 565x1250x34 +/- 1 mm
Output Values are +/- 10%
Module tested at 3500 Vdc

MODULE CERTIFIED TO CEC Spec. 503 by JRC ISPRA
20 years limited output guarantee.
Specifications are subjected to change without notice

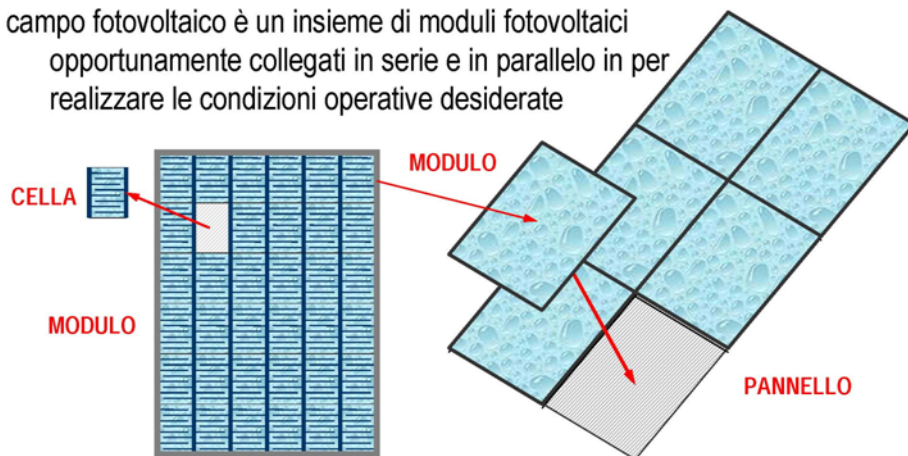
- **Potenza di picco: P_m**
- Corrente di corto circuito: I_{sc}
- Tensione a vuoto: V_{oc}
- Tensione al punto di massima potenza: V_m
- Corrente al punto di massima potenza: I_m
- Temperatura nominale di funzionamento di una cella: NOCT
- Dimensioni modulo
- Tolleranza valori
- Garanzie



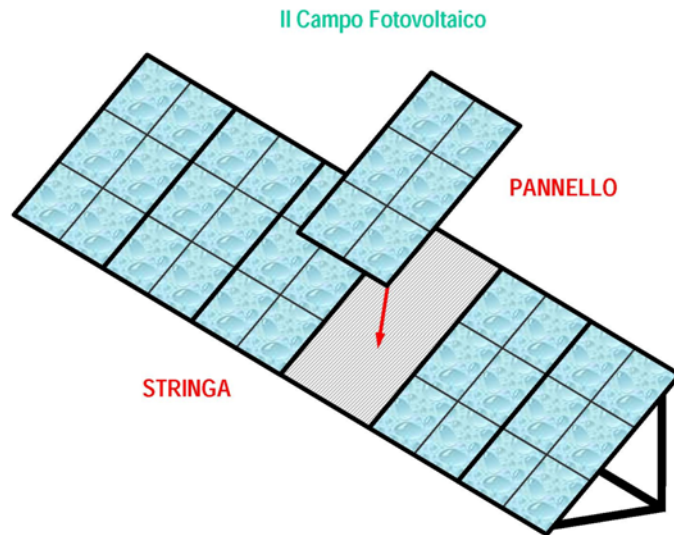
CAMPO FOTOVOLTAICO

Il Campo Fotovoltaico

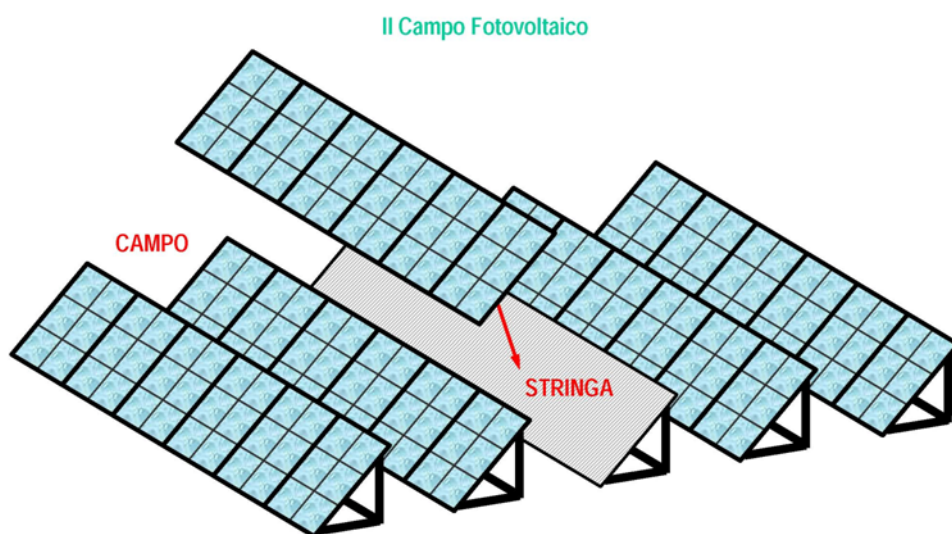
Il campo fotovoltaico è un insieme di moduli fotovoltaici opportunamente collegati in serie e in parallelo in per realizzare le condizioni operative desiderate



CAMPO FOTOVOLTAICO

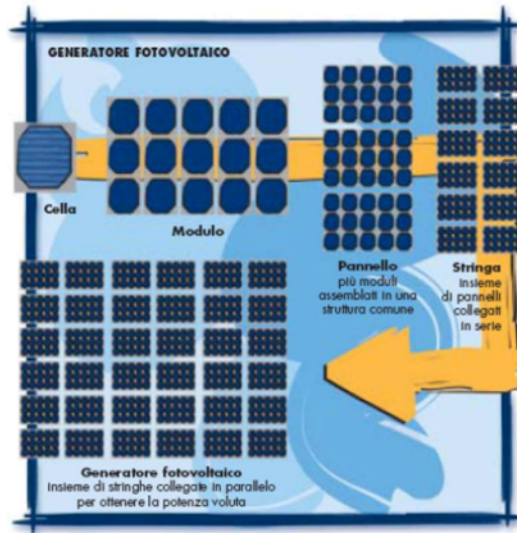


CAMPO FOTOVOLTAICO



CAMPO FOTOVOLTAICO

Moduli fotovoltaici



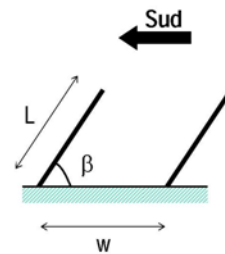
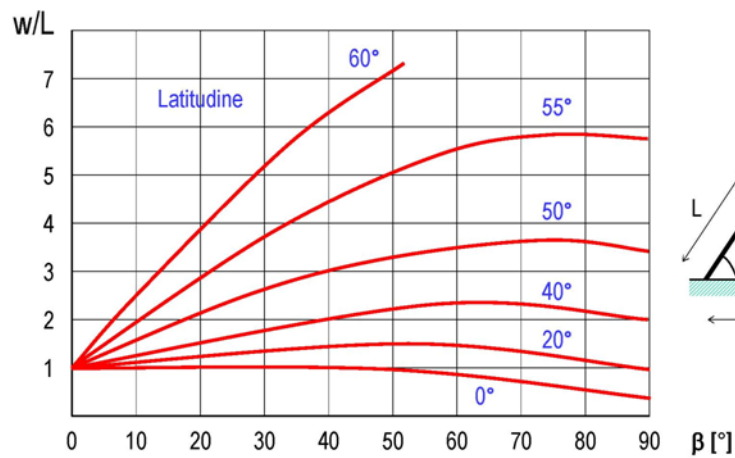
Un modulo fotovoltaico è composto da un insieme di celle connesse in serie (per aumentare la tensione) e in parallelo (per aumentare la corrente).

L'efficienza complessiva del modulo è sempre leggermente inferiore a quella delle celle.

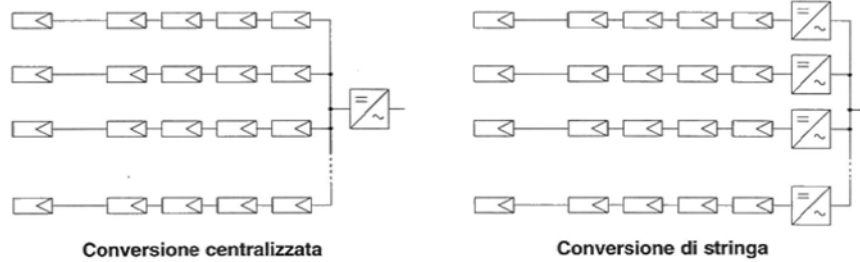
Fonte: ENEA

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

(Minima distanza tra le file w) / (Lunghezza dei pannelli L)



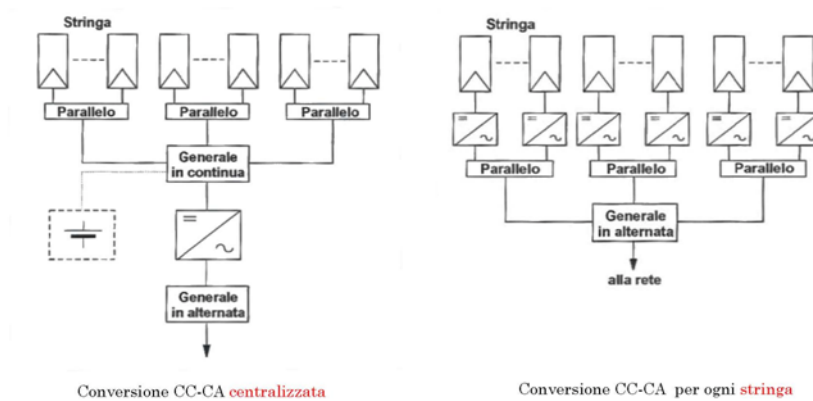
IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI



Conversione CC-CA **centralizzata** un solo inverter per il generatore
una maggiore estensione della rete in CC

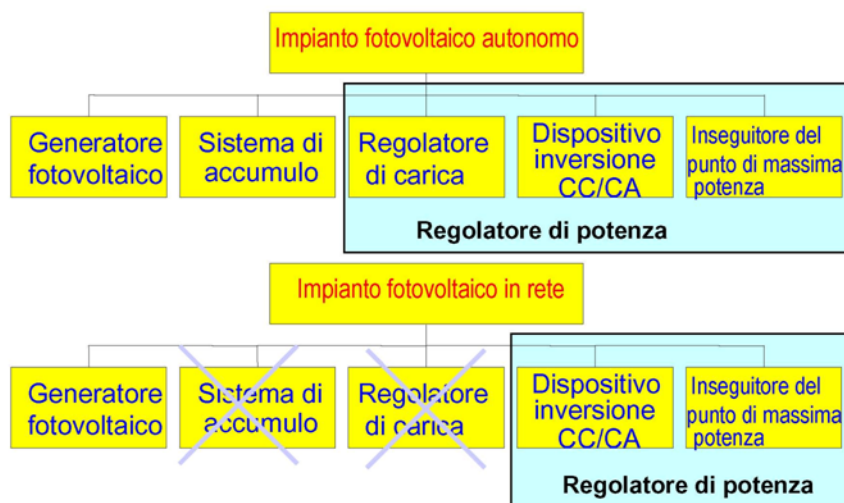
Conversione CC-CA per ogni **stringa** un inverter per ogni stringa
minore estensione della rete in CC sistema più modulare

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI



Influenza dell'architettura sull'organizzazione dei quadri elettrici

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI



IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Generatore: Rendimento

Il **rendimento** del generatore dipende da:

rendimento dei singoli pannelli o moduli

le perdite per scostamento delle condizioni di funzionamento effettive da quelle nominali (**5÷8%**)

temperatura diversa da quella standard (25°C)

irradianza solare diversa da quella standard (1000 W/m²K)

perdite per riflessione della radiazione solare incidente

il rendimento nominale è misurato per radiazione incidente perpendicolare, mentre in realtà l'angolo d'incidenza e quindi la quota riflessa variano in funzione dell'ora del giorno; (**3%**)

le perdite di mismatch tra le stringhe

in una **serie** di moduli la corrente è limitata dal modulo che eroga l'amperaggio più basso, mentre in un **parallelo** è il voltaggio ad essere limitato dal modulo che ha la tensione di lavoro minore

tale fenomeno può arrivare a provocare perdite dell'ordine del **5-10%** della potenza nominale, che possono, tuttavia, essere sensibilmente ridotte studiando una opportuna e specifica configurazione serie - parallelo del generatore

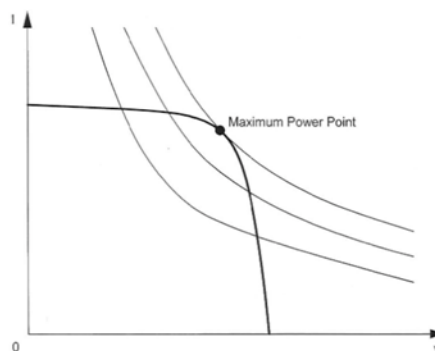
IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Inseguitore di Massima Potenza

L'inseguitore del punto di massima potenza MPPT è un dispositivo composto di un **convertitore CC/CC con rapporto di trasformazione k variabile** e da un sistema di regolazione che, in base alla richiesta di carico, agisce sul k **massimizzando la potenza trasferita** dal campo fotovoltaico in quella situazione di irradianza e temperatura. Esso fa in

modo che il generatore "veda" sempre ai suoi capi un carico ottimale.

Il punto di massima potenza è individuato dalla tangenza dell'iperbole $I \cdot V = \text{cost}$ (potenza costante) con la curva caratteristica.



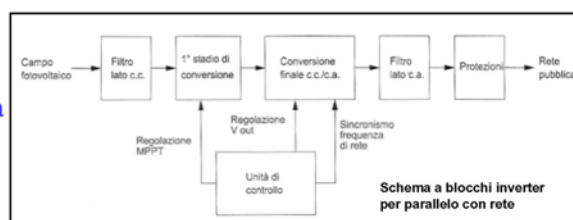
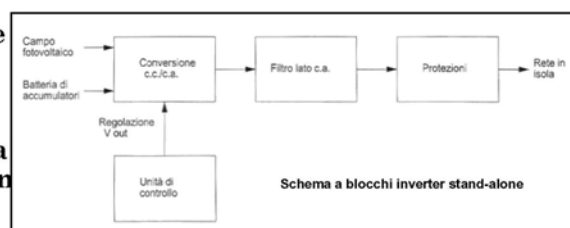
IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Dispositivo di conversione CC-CA - l'Inverter

Il convertitore corrente continua – corrente alternata, detto **inverter**, ha il compito di trasformare l'energia fotovoltaica, prodotta in C.C. in corrente alternata C.A. della frequenza desiderata.

Inverter più utilizzati:

- inverter a **commutazione forzata** per sistemi isolati
- inverter a **commutazione naturale** per sistemi collegati in rete



IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

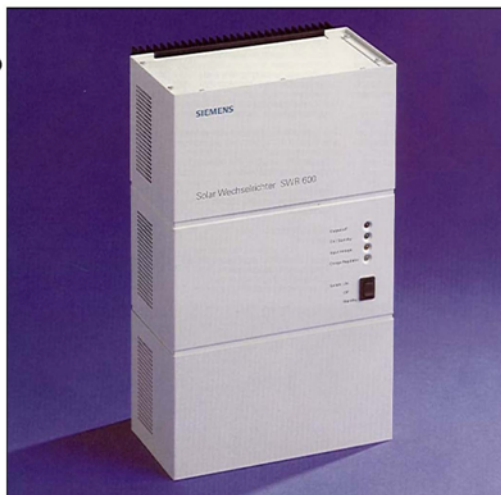
Caratteristiche dell'Inverter

I requisiti richiesti ad un inverter atto ad essere impiegato in un impianto fotovoltaico sono:

- basso consumo in assenza di carico;
- bassa distorsione armonica;
- dimensioni e peso limitati;
- elevata affidabilità;
- elevato rendimento.

-Quest'ultimo si ha solo se la potenza in ingresso sia superiore al 10% della sua potenza nominale, cioè per

$$P_{cc}/P_n > 0,1$$



Inverter Siemens SWR 600

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Stima del rendimento η_g

Il rendimento medio annuale $\overline{\eta}_g$ dell'intero sistema fotovoltaico è calcolabile come il prodotto di due distinti rendimenti:

$$\overline{\eta}_g = \eta_{\text{mod}}^N \cdot \overline{\eta}_{\text{bos}}$$

il rendimento **Nominale** del singolo modulo fotovoltaico, η_{mod}^N

il rendimento medio della restante parte del sistema, $\overline{\eta}_{\text{bos}}$

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Stima del rendimento η_g

Una stima di massima del rendimento medio annuale dell'intero sistema fotovoltaico $\overline{\eta}_g$ è desumibile dalle seguenti tabelle:

Rendimento globale sistema isolato	con convertitore cc/ca	senza convertitore cc/ca
Sistema con moduli in silicio monocristallino	8.5%	9.5%
Sistema con moduli in silicio policristallino	7%	8%
Sistema con moduli in silicio amorfo	4%	5%

Rendimento globale sistema connesso in rete	con convertitore cc/ca
Sistema con moduli in silicio monocristallino	10%
Sistema con moduli in silicio policristallino	8.5%
Sistema con moduli in silicio amorfo	5%

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Il rendimento **Nominale** η^N_{mod} di un modulo fotovoltaico è un dato che fornisce il costruttore. In assenza di dati specifici si possono assumere i seguenti valori per le diverse tipologie di celle:

Rendimento moduli fotovoltaici	η_{mod}
Silicio monocristallino	13%
Silicio policristallino	11%
Silicio amorfo	6.5%

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Stima del rendimento medio $\overline{\eta}_{bos}$

Il rendimento medio della restante parte del sistema, detto anche rendimento di “*balance of system*” (*bos*), tiene conto di:

- le perdite legate ad una ridotta disponibilità di radiazione solare per effetto delle riflessioni, ombreggiamenti e sporcamento della superficie
- le perdite legate ad un funzionamento del modulo in condizioni non standard (temperatura, mismatch ..)
- le perdite elettriche sul circuito ed apparati in corrente continua
- le perdite dell'eventuale accumulatore
- le perdite del convertitore cc/ca
- le perdite di eventuali ausiliari

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Stima del rendimento medio $\overline{\eta}_{bos}$

Il valore medio stagionale delle singole perdite non è di facile stima, perchè **dipende dalle condizioni di esercizio** del sistema oltre che da quelle climatiche.

Perdite % relative ai vari sottosistemi valori medi indicativi	stand-alone		connesso in rete
	con convertitore cc/ca	senza convertitore cc/ca	
Perdite per bassa radiazione e ombreggiamento	3%	3%	3%
Perdite per polluzione sui moduli	1%	1%	1%
Perdite per riflessione	3%	3%	3%
Perdite per scostamento dalle condizioni di targa (temperatura)	8%	8%	8%
Perdite per mismatching tra le stringhe (moduli)	5%	5%	5%
Perdite in corrente continua	1%	1%	1%
Perdite del sistema di accumulo ⁽¹⁾	12%		
Perdite sul sistema di conversione cc/ca ⁽¹⁾	12%	12%	8%
Perdite nei filtri e nei servizi ausiliari	2%	2%	2%

⁽¹⁾ Valore medio annuo stimato

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

L'energia producibile $W_{el,prod}$ da un impianto solare fotovoltaico è stimabile come

$$W_{el,prod} = \overline{\eta}_g \cdot A \cdot H_T|_{anno}$$

dove

$\overline{\eta}_g$ è il rendimento globale medio annuale dell'intero impianto fotovoltaico

A è l'area lorda della superficie del generatore fotovoltaico

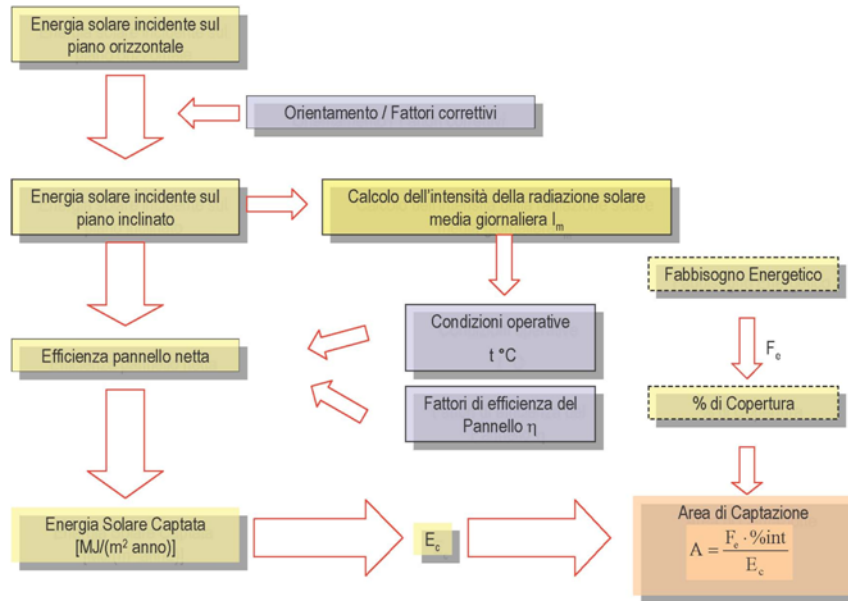
$H_T|_{anno}$ è l'irradiazione solare annuale sul generatore

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

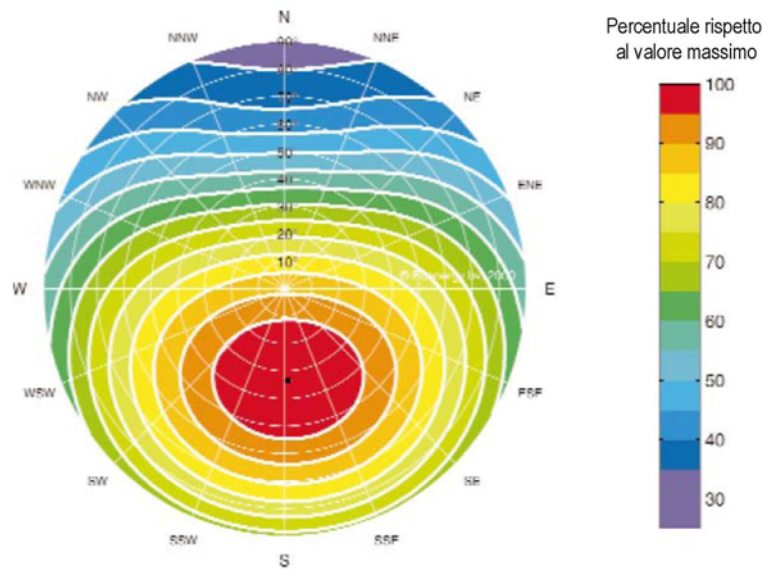
Manutenzione

- L'affidabilità dei sistemi fotovoltaici è in genere elevata e la manutenzione si riduce ad un'azione di controllo preventivo, che può essere effettuato su base annuale.
- L'unico elemento effettivamente soggetto ad un'opera di manutenzione è, se presente, l'accumulatore elettrico
- In particolari situazioni può essere anche necessaria una verifica saltuaria dello stato di sporcamento dei moduli fotovoltaici

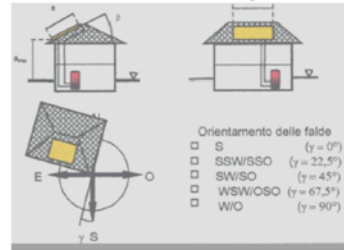
PROCEDURA DI DIMENSIONAMENTO



RADIAZIONE SOLARE GLOBALE ANNUA



INCLINAZIONE E ORIENTAMENTO



orientamento Sud: 0° Est/Ovest: 90°	angolo di inclinazione						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0	0.89	0.97	1	0.99	0.93	0.83	0.69
15	0.89	0.96	1	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	0.9	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

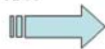
IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Calcolo dell'energia producibile

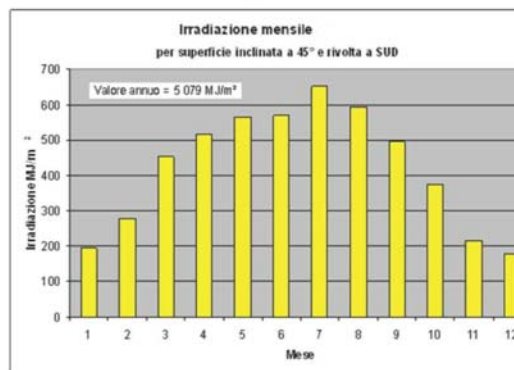
Dalla UNI 10349 e con la UNI 8477/1, calcolata

l'irradianza solare
annua in**5 070 MJ/m²****1 411 kWh/m²**l'energia producibile
è data per $\eta_g = 9.6\%$ $A = 10 \text{ m}^2$

da

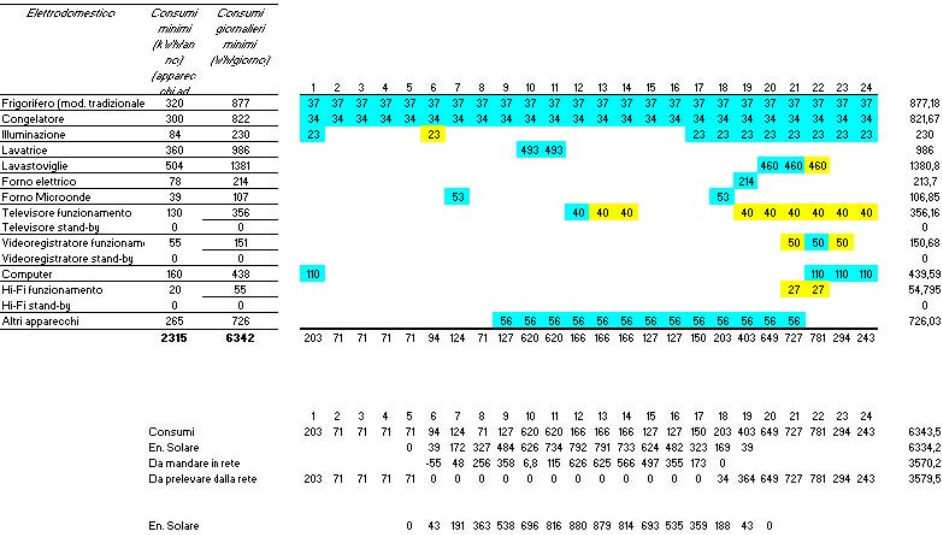


$$W_{prod} = \overline{\eta}_g \cdot A \cdot H_T \Big|_{anno} = 1357 \text{ kWh}$$



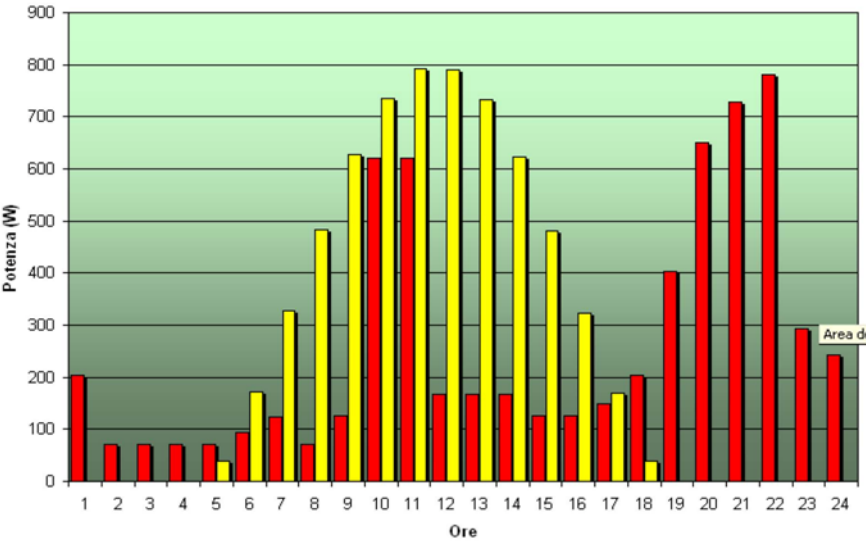
PROCEDURA DI DIMENSIONAMENTO

Consumi elettrici famiglia tipo (fonte: elaborazione dati ENEA)



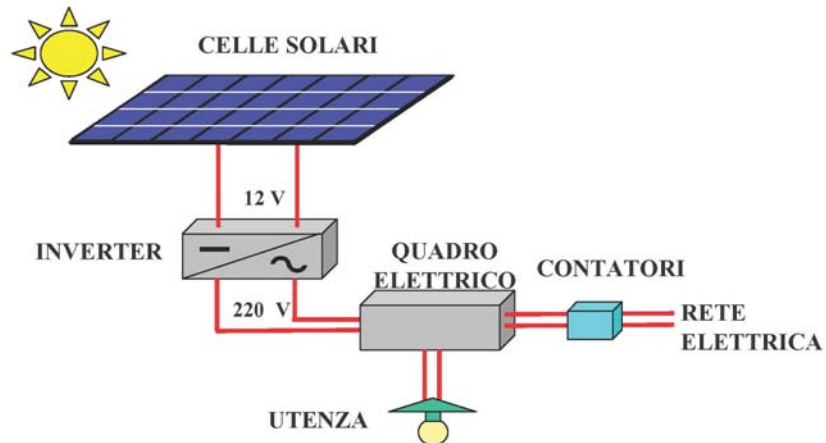
PROCEDURA DI DIMENSIONAMENTO

Consumi elettrici



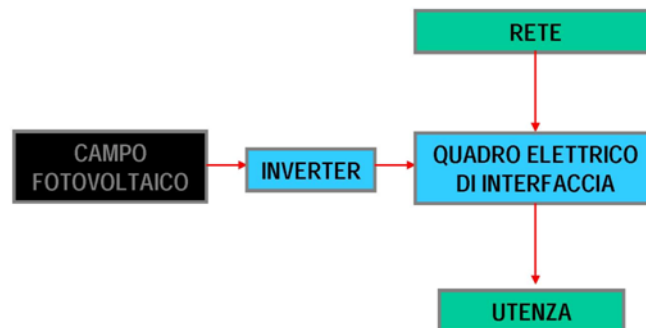
GRID CONNECTED

Schema di un impianto collegato alla rete pubblica (grid connected)



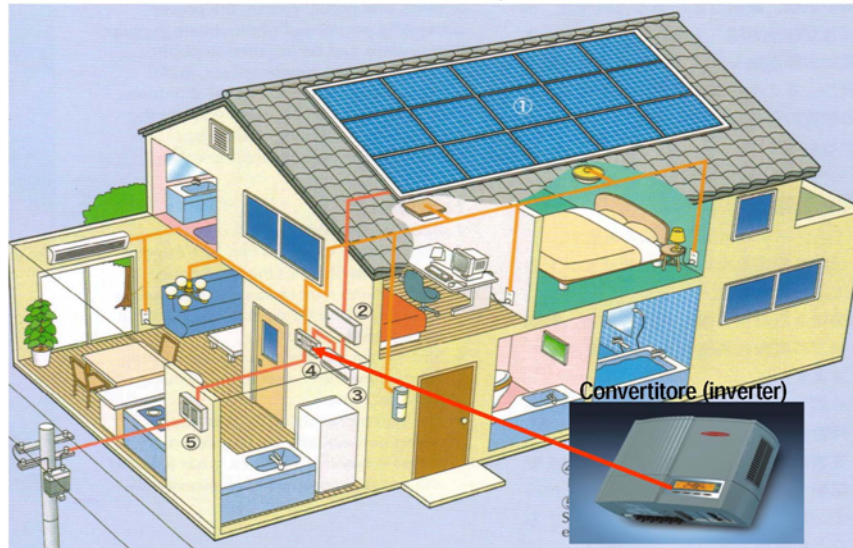
GRID CONNECTED

.... Impianto Collegato alla Rete



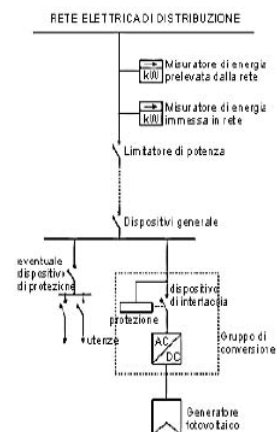
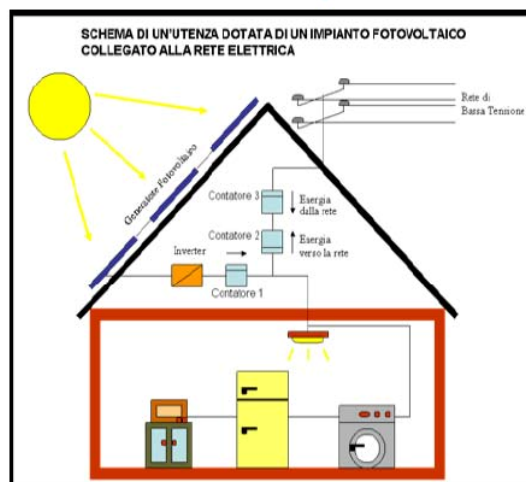
COM'È FATTO UN TETTO FOTOVOLTAICO ?

Impianti solari fotovoltaici grid connected



GRID CONNECTED

Schema di impianto connesso a rete



26

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

APPLICAZIONI RESIDENZIALI



IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

APPLICAZIONI INDUSTRIALI



IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

INTEGRAZIONE ARCHITETTONICA



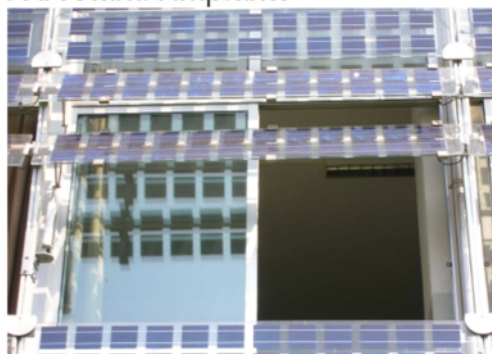
ISTITUTO IPSIA DI ROVIGO

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Applicazione per sovrapposizione: Edificio scolastico di Rovigo



Rispetto del flusso di luce e aria necessaria agli ambienti retrostanti l'impianto



IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Applicazione per integrazione: Ospedale Meyer di Firenze



Integrazione di PV negli edifici



Integrazione di PV negli edifici



FOTOVOLTAICO



FOTOVOLTAICO



FOTOVOLTAICO



FOTOVOLTAICO



FOTOVOLTAICO



IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

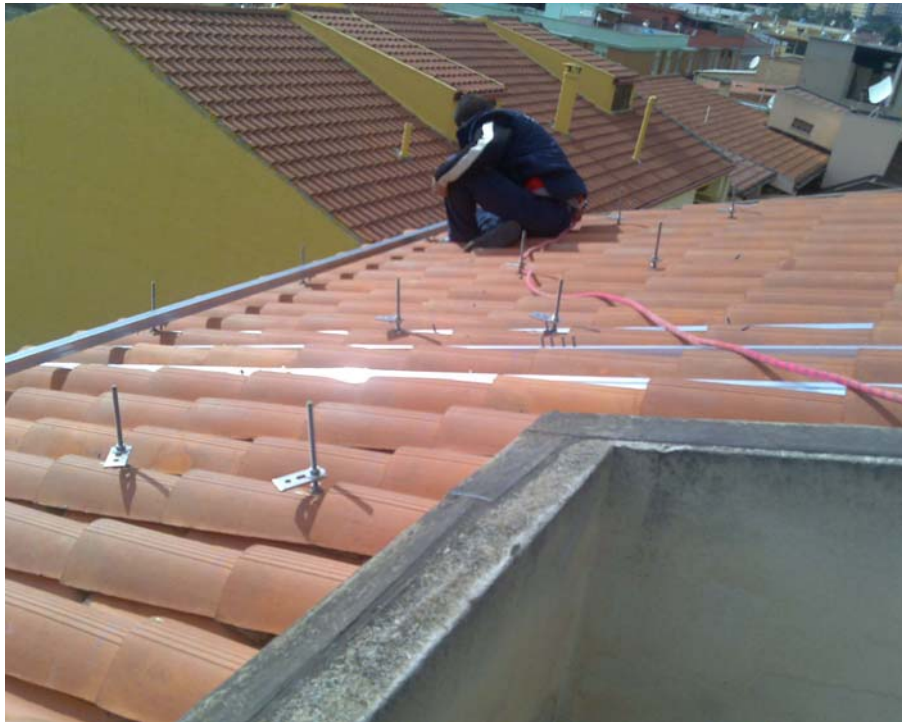
Performance

Risparmio energetico: 25%

Resa minima garantita: 80%

Ritorno sull'investimento: <10 anni





IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

L'importanza dei dettagli



IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Il generatore fotovoltaico



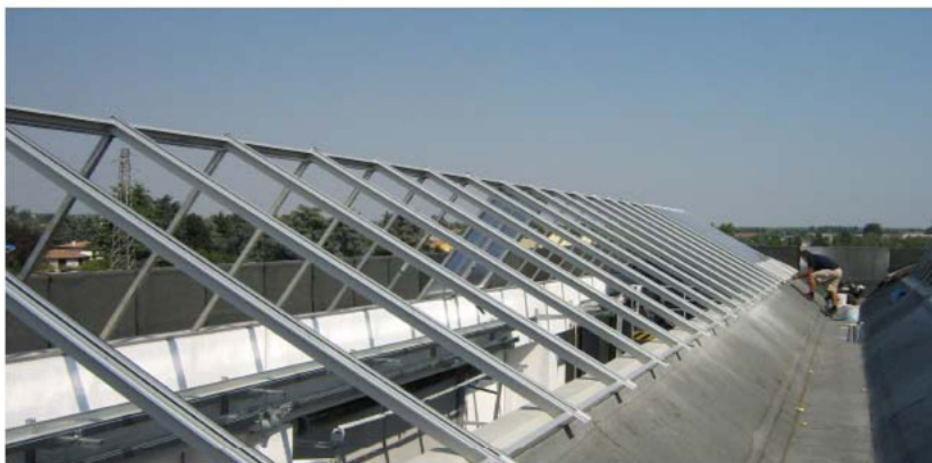
IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Panoramica



Impianto fotovoltaico installato su tetto, **837,48 kW_p**

IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI



IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI







Sistemi Fotovoltaici



Sassari 20 Marzo 2009



Dott . Ing. Stefano Floris