



**Certificazione  
— energetica —**

**CORSO TECNICO-PRATICO  
CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI**

Giovedì 3 Novembre 2016  
Ing. Dario Vannini



**CORSO CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI**  
Ordine e Fondazione Architetti PPC della Provincia di Modena



**IL CONTRIBUTO DELLE  
FONTI ENERGETICHE  
RINNOVABILI SOLARI**

I parte

## INDICE

- Capitolo 1 – Le fonti energetiche rinnovabili
- Capitolo 2 – La radiazione solare
- Capitolo 3 – Gli impianti solari termici
- Capitolo 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

3 di 89

### 1 – Le fonti energetiche rinnovabili



## Energie rinnovabili?

A stretto rigore, l'energia non si produce, e quindi nessuna fonte energetica è rinnovabile.

ENERGIE RINNOVABILI sono per convenzione le fonti energetiche:

- la cui disponibilità viene costantemente rinnovata
- sono, ai fini pratici, inesauribili
- non modificano l'ambiente (sono eco-sostenibili e non clima-alteranti)

#### D.G.R. E-R 1275/2015

**energia da fonti rinnovabili:** energia proveniente da fonti rinnovabili non fossili, vale a dire energia eolica, solare, aerotermica, geotermica, idrotermica e oceanica, idraulica, biomassa, gas di discarica, gas residui dai processi di depurazione e biogas; in particolare, si intende per:

- energia aerotermica: l'energia accumulata nell'aria ambiente sotto forma di calore;
- energia geotermica: energia immagazzinata sotto forma di calore sotto la crosta terrestre;
- energia idrotermica: l'energia immagazzinata nelle acque superficiali sotto forma di calore;

biomassa: la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali o animali), dalla silvicoltura o dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani.

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

4 di 89

CORSO CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI  
Ordine e Fondazione Architetti PPC della Provincia di Modena

1 – Le fonti energetiche rinnovabili ■ □ □ □

### Energie rinnovabili, alternative, pulite

Una fonte energetica **rinnovabile** non è necessariamente **alternativa**

Una fonte energetica **rinnovabile** non è necessariamente **pulita**  
(almeno nell'intorno di produzione)

Il contributo delle fonti rinnovabili solari Ing. Dario Vannini 5 di 89

CORSO CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI  
Ordine e Fondazione Architetti PPC della Provincia di Modena

1 – Le fonti energetiche rinnovabili ■ □ □ □

### Fattori di valutazione nella scelta e nella progettazione

- EFFICIENZA** *del processo*
- SOSTENIBILITA'** *(riserve e risorse)*
- ECO-COMPATIBILITA'** *(clima e ambiente)*
- DISPONIBILITA'** *(location, densità energetica)*
- COERENZA** *con l'utilizzo*
- COSTO** *dell'energia resa (investimento)*

Il contributo delle fonti rinnovabili solari Ing. Dario Vannini 6 di 89

1 – Le fonti energetiche rinnovabili



Punti di vista

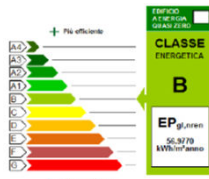
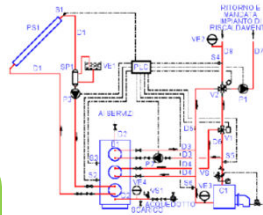
UTENTE

- Costi
- Prestazioni
- Manutenzione
- Affidabilità
- Usabilità
- Disponibilità



PROGETTISTA

- Complessità
- Normativa
- Integrabilità



CERTIFICATORE

- Rilievo e calcolo prestazioni
- Definizione interventi migliorativi

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini 7 di 89

INDICE

- Capitolo 1 – Le fonti rinnovabili
- Capitolo 2 – La radiazione solare
- Capitolo 3 – Gli impianti solari termici
- Capitolo 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



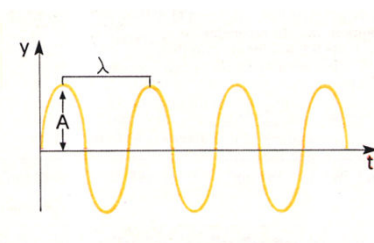
Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini 8 di 89



**La radiazione elettromagnetica**

La *radiazione elettromagnetica* può essere vista sotto il duplice aspetto di fenomeno *ondulatorio* (sistemi di campi elettromagnetici variabili che si propagano nello spazio) o *particellare* (propagazione di particelle, dette *fotoni*).

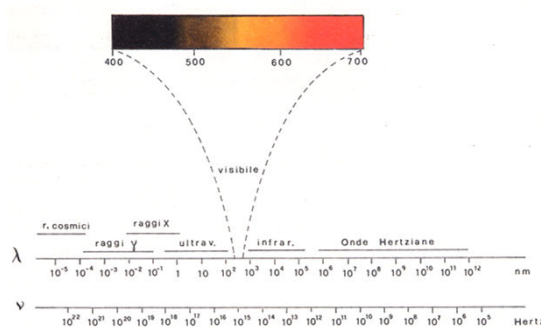


$c = \lambda \nu$

Ampiezza (A):  
l'ampiezza dei picchi o la profondità dei ventri  
Lunghezza d'onda ( $\lambda$ ):  
la distanza fra due picchi (o due ventri) consecutivi  
Frequenza ( $\nu$ ):  
il numero di picchi (o ventri) che passano davanti all'osservatore nell'unità di tempo



**La radiazione elettromagnetica**



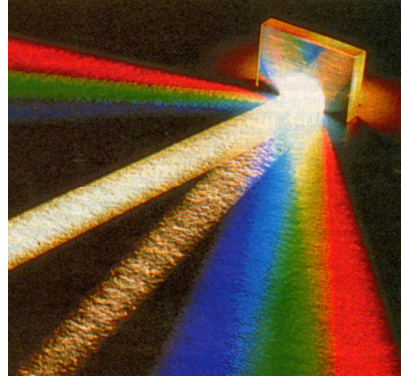
Se si assume il modello ondulatorio, la radiazione elettromagnetica viene emessa in uno spettro continuo di lunghezze d'onda che vanno dalle onde radio (lunghezza d'onda da 10 km a 1 m) fino alla radiazione gamma (lunghezze d'onda di 10<sup>-4</sup> nm).



### La radiazione elettromagnetica

Lo *spettro visibile* è quella sezione dello spettro elettromagnetico a cui è sensibile la retina dell'occhio umano (circa 400÷700 nm).

Le lunghezze d'onda al di sotto della finestra visibile sono dette raggi *infrarossi*; quelle al di sopra *ultravioletti*.



### Irraggiamento

Irraggiamento: la trasmissione di calore associata alla propagazione della radiazione elettromagnetica. E' l'unica modalità di trasferimento di calore possibile nel vuoto.

Nell'irraggiamento, il calore è trasportato dalle onde elettromagnetiche che tutti i corpi (solidi, liquidi o gassosi) emettono ed assorbono come risultato di cambiamenti nella configurazione elettronica degli atomi di cui sono composti.

La *radiazione termica* è localizzata principalmente nelle lunghezze d'onda dell'*infrarosso*.

Nonostante ciò, se un corpo viene riscaldato a temperatura sufficiente, esso emette una frazione significativa di energia anche alle lunghezze d'onda dello spettro visibile (sole, filamento delle lampadine).

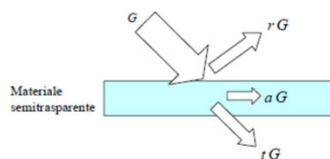
## 2 – La radiazione solare



## Radiazione incidente su una superficie

La radiazione incidente su di una superficie per unità di area e di tempo è detta *irradiazione* e si indica generalmente con  $G$  [ $W/m^2$ ]. Quando la radiazione incide su di una superficie parte di essa viene assorbita, parte riflessa e la restante parte, se c'è, viene trasmessa.

La somma delle frazioni di radiazione assorbita, riflessa e trasmessa è unitaria ( $a + r + t = 1$ ). Le tre frazioni prendono il nome di coefficiente di assorbimento ( $a$ ), riflessione ( $r$ ) e trasparenza ( $t$ ).



Nei *corpi opachi* il coefficiente di trasparenza è nullo, quindi la radiazione può essere solo assorbita e/o riflessa.

Se si annulla anche il coefficiente di riflessione, il coefficiente di assorbimento è unitario; tutta la radiazione che colpisce il corpo viene assorbita: il corpo viene detto *corpo nero*.

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

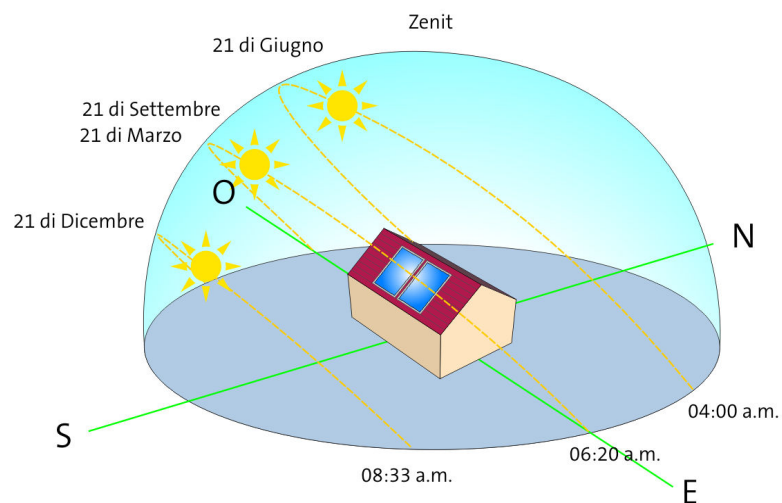
Ing. Dario Vannini

13 di 89

## 2 – La radiazione solare



## La traiettoria del sole



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

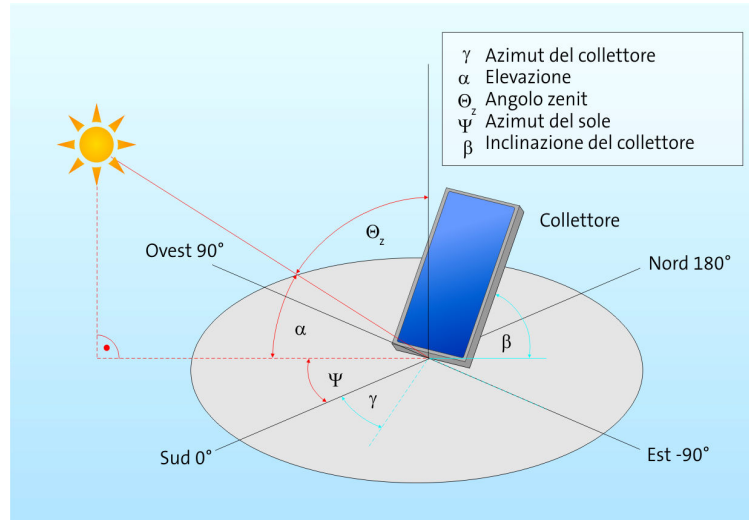
Ing. Dario Vannini

14 di 89

2 – La radiazione solare



Angoli importanti



- $\gamma$  Azimut del collettore
- $\alpha$  Elevazione
- $\theta_z$  Angolo zenit
- $\psi$  Azimut del sole
- $\beta$  Inclinazione del collettore

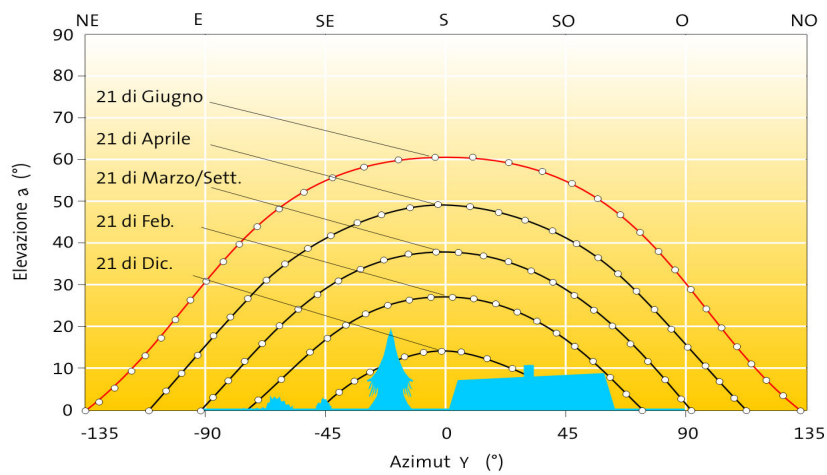
Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini 15 di 89

2 – La radiazione solare



Diagramma dell'elevazione solare



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

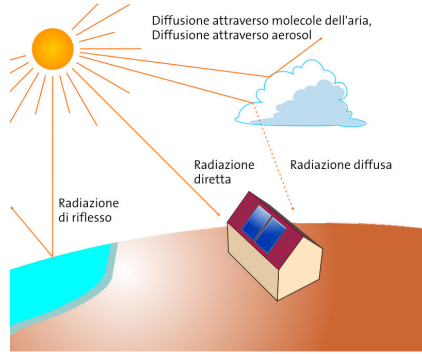
Ing. Dario Vannini 16 di 89



2 – La radiazione solare



**Interazione radiazione solare - atmosfera**



La capacità che una superficie ha di riflettere la radiazione solare verso l'esterno viene misurata attraverso il *coefficiente di albedo*. L'albedo varia a seconda del materiale, tuttavia mediamente può essere assunto pari a 0,2.

Tipo di superficie	Albedo	Tipo di superficie	Albedo
Manto erboso (in estate)	0,25	Asfalto	0,15
Prato	0,18 – 0,23	Bosco	0,5 – 0,18
Prato secco	0,28 – 0,32	Sabbia	0,10 – 0,25
Campo incolto	0,26	Acqua	0,05
Terreno arido	0,17		0,08
Ghiaia	0,18		0,12
Muratura nuova	0,30		0,22
Muratura invecchiata	0,20	Neve fresca	0,80 – 0,90

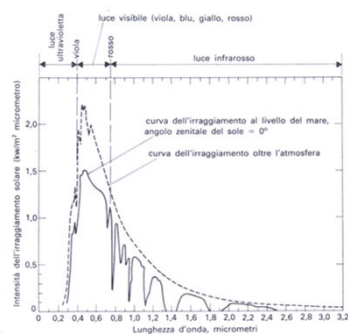
Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini 17 di 89

2 – La radiazione solare



**La radiazione al suolo**



La figura mostra in linea tratteggiata lo spettro della radiazione solare, in vicinanza della Terra, ma al di sopra dell'atmosfera; in linea continua quello a livello del mare. Il totale dell'energia in arrivo dal Sole, cioè la costante solare, è pari a:  
1,36 kW/m<sup>2</sup>

Quando il sole è in posizione perfettamente verticale la luce solare compie il percorso più breve attraverso l'atmosfera; se invece il sole si trova ad un'angolazione più bassa il percorso diventa più lungo, il che provoca un maggiore assorbimento e dispersione della radiazione solare e, di conseguenza, una minore intensità della radiazione stessa al suolo, nonché una variazione delle caratteristiche spettrali della radiazione dovuta al più lungo passaggio attraverso il "filtro" atmosfera.

Il parametro "*Massa d'Aria*", (*Air Mass*, AM), è definito come il rapporto tra la lunghezza del percorso effettivo della luce solare attraverso l'atmosfera terrestre e la lunghezza del percorso minimo, che si verifica nel caso di radiazione perpendicolare alla superficie terrestre.

$$AM = \frac{1}{\sin \gamma_s}$$

Con il sole in posizione verticale ( $\gamma_s = 90^\circ$ ), AM=1.

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini 18 di 89

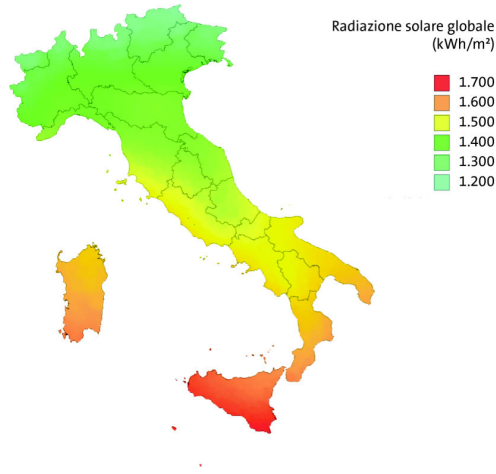
2 – La radiazione solare



Carta irradiazione su superficie orizzontale

Esistono molte mappe della radiazione solare, provenienti da diverse fonti d'informazione, e tavole con valori calcolati delle componenti diretta, diffusa e globale su piano inclinato. Non tutti sono sufficientemente affidabili ai fini dei calcoli per gli impianti solari, pur essendoli per altri scopi (agricoltura, economia, ecc.).

La norma UNI di riferimento è la 10349 del **2016 NEW**

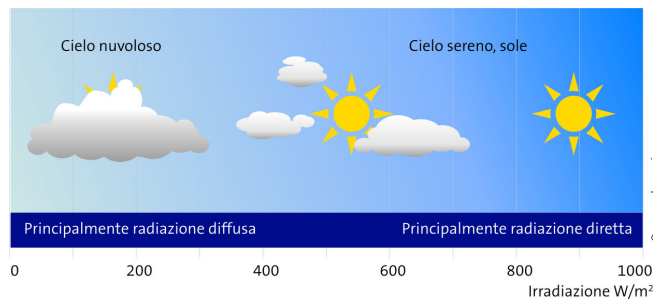


© ENEA

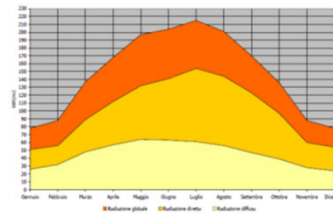
2 – La radiazione solare



Incidenza delle componenti della radiazione



Radiazione solare	Condizioni atmosferiche							
	Cielo sereno	Nebbia	Nuvoloso	Disco solare giallo	Disco solare bianco	Sole appena percettibile	Nebbia fitta	Cielo coperto
globale	1000 W/m²	600 W/m²	500 W/m²	400 W/m²	300 W/m²	200 W/m²	100 W/m²	50 W/m²
diretta	90%	5%	7%	50%	40%	0%	0%	0%
diffusa	10%	95%	93%	50%	60%	100%	100%	100%

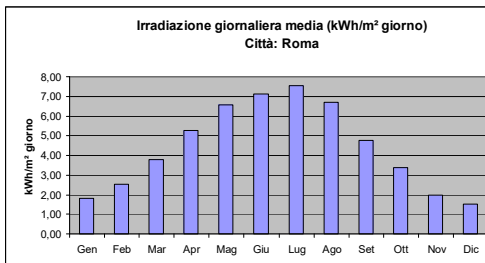


2 – La radiazione solare



**Calcolo della radiazione solare**

Radiazione giornaliera, media mensile, incidente su superfici variamente inclinate, kWh/m<sup>2</sup> giorno (sito di installazione: Roma)



	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	Annuale
orizzontale	1,69	2,54	3,78	4,89	6,02	6,58	6,86	6,16	4,69	3,29	2,02	1,51	4,19
10° sud	2,05	2,9	4,13	5,24	6,15	6,64	6,99	6,44	5,11	3,76	2,43	1,87	4,48
30° sud	2,69	3,42	4,52	5,37	6	6,31	6,77	6,55	5,55	4,43	3,05	2,42	4,76
latitudine sud	2,8	3,57	4,56	5,22	5,66	5,87	6,36	6,33	5,56	4,62	3,28	2,66	4,71
60° sud	2,83	3,58	4,33	4,67	4,82	4,86	5,35	5,58	5,52	4,61	3,42	2,83	4,35
verticale sud	2,65	3,02	3,31	3,25	2,92	2,77	3,1	3,56	3,82	3,8	305	2,61	3,15
verticale SO/SE	2,12	2,52	3,05	3,28	3,35	3,38	3,65	3,85	3,64	3,19	2,45	2,06	3,05
verticale E/O	1,23	1,67	2,4	2,99	3,42	3,65	3,77	3,61	2,92	2,12	1,46	1,15	2,54

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

21 di 89

**INDICE**

- Capitolo 1 – Le fonti rinnovabili
- Capitolo 2 – La radiazione solare
- Capitolo 3 – Gli impianti solari termici
- Capitolo 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

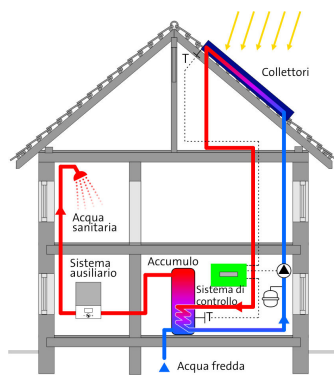
Ing. Dario Vannini

22 di 89

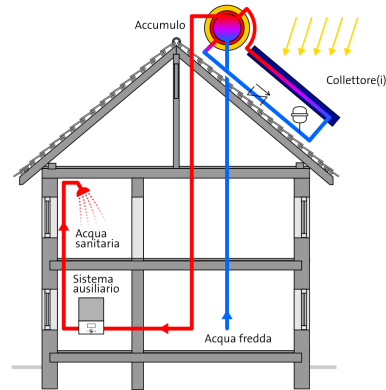
3 – Gli impianti solari termici



Schema impianti



Impianto a circolazione forzata



Impianto a circolazione naturale

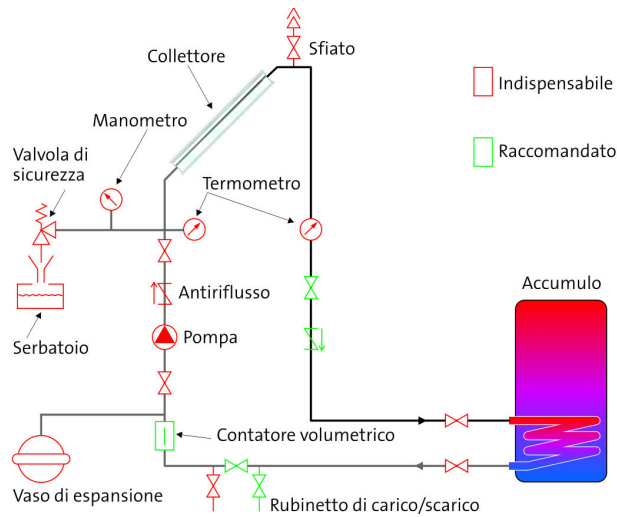
Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini 23 di 89

3 – Gli impianti solari termici



Impianti a circolazione forzata



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini 24 di 89

CORSO CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI  
Ordine e Fondazione Architetti PPC della Provincia di Modena

3 – Gli impianti solari termici

### Impianti a circolazione naturale

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini 25 di 89

CORSO CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI  
Ordine e Fondazione Architetti PPC della Provincia di Modena

3 – Gli impianti solari termici

### Principi di funzionamento

- La conversione dell'energia proveniente dal Sole in energia termica è effettuata dai collettori solari. Nelle applicazioni che richiedono temperature inferiori ai 100 °C vengono utilizzati prevalentemente collettori piani.
- Il principio di funzionamento è molto semplice: una superficie esposta alla radiazione solare assorbe parte dell'energia, riscaldandosi; la quantità assorbita dipende dal coefficiente  $\alpha$  che definisce il grado di nerezza di una superficie ( $\alpha$  è circa uguale a 1 per le superfici nere).
- La superficie colpita dalla radiazione solare a sua volta irraggia energia con una distribuzione spettrale che dipende dalla temperatura (legge di Wien) e cede il calore all'ambiente, che si trova ad una temperatura inferiore, per conduzione e convezione.

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

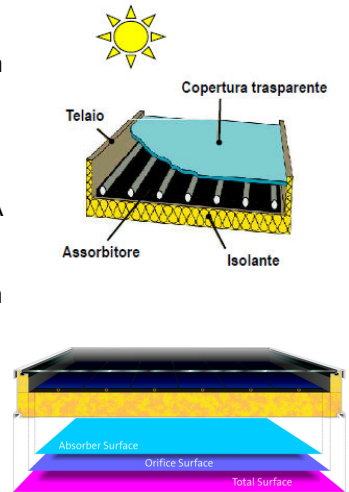
Ing. Dario Vannini 26 di 89

## 3 – Gli impianti solari termici



## Collettore solare

- **Assorbitore:** ha la funzione di captare l'energia irradiata dal sole e di trasferirla sotto forma di energia termica al fluido che circola all'interno
- **Copertura trasparente:** permette il passaggio della radiazione solare, in genere nel campo di lunghezza d'onda  $\lambda$  compresa tra 0,2 e 3  $\mu\text{m}$ , mentre è opaca alla radiazione emessa dalla piastra con lunghezze d'onda superiori a 3  $\mu\text{m}$  (effetto serra)
- **Isolante:** sulle pareti laterali e sulla parte opposta a quella di ricezione della radiazione, che limita le dispersioni termiche della piastra.
- **Telaio:** che racchiude i componenti del collettore solare e costituisce la struttura di supporto.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

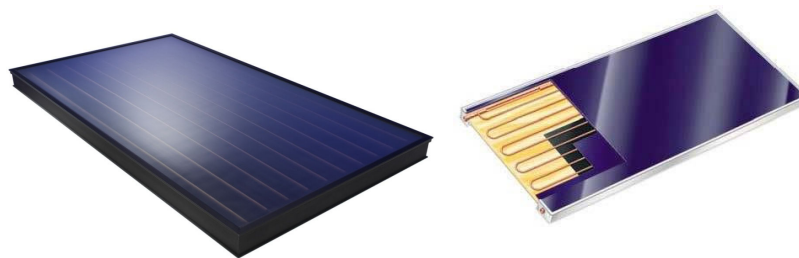
Ing. Dario Vannini

27 di 89

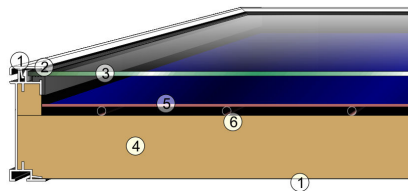
## 3 – Gli impianti solari termici



## Collettori solari piani



1. Scatola
2. Guarnizione impermeabilizzante
3. Rivestimento trasparente
4. Isolamento termico
5. Placca assorbente di rame
6. Tubi di rame



Il contributo delle fonti rinnovabili solari


Ing. Dario Vannini

28 di 89

CORSO CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI  
Ordine e Fondazione Architetti PPC della Provincia di Modena


3 – Gli impianti solari termici □ □ ■ □

### Collettori solari piani



Condizioni  
ESERCIZIO

- Tutte le località (latitudine e altitudine);
- Tutto il periodo dell'anno.



UTILIZZO

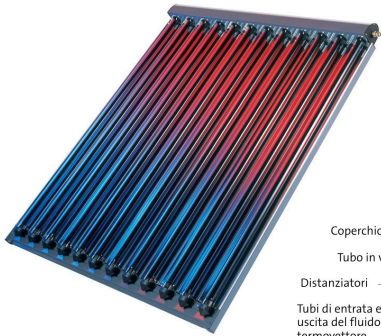
- Riscaldamento dell'acqua sanitaria e acqua delle piscine;
- Riscaldamento dell'acqua per processi industriali a bassa temperatura.

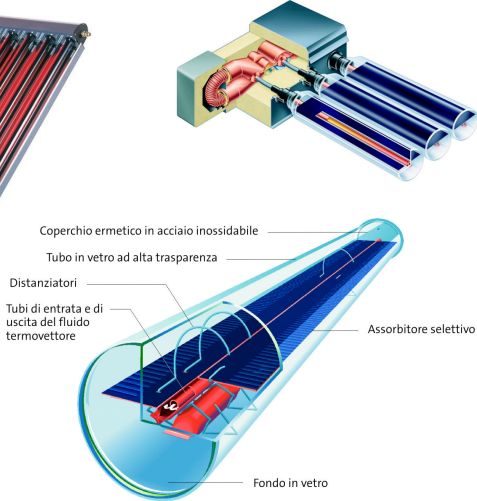
Il contributo delle fonti rinnovabili solari Ing. Dario Vannini 29 di 89

CORSO CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI  
Ordine e Fondazione Architetti PPC della Provincia di Modena

3 – Gli impianti solari termici □ □ ■ □

### Collettori a tubi sottovuoto





Coperchio ermetico in acciaio inossidabile

Tubo in vetro ad alta trasparenza

Distanziatori

Tubi di entrata e di uscita del fluido termovettore

Assorbitore selettivo


Fondo in vetro

Il contributo delle fonti rinnovabili solari Ing. Dario Vannini 30 di 89


CORSO CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI  
Ordine e Fondazione Architetti PPC della Provincia di Modena

3 – Gli impianti solari termici □ □ ■ □

### Collettori a tubi sottovuoto



Condizioni  
ESERCIZIO



UTILIZZO

- Località con bassa temperatura esterna o bassa insolazione;
- Tutto il periodo dell'anno.

- Riscaldamento dell'acqua sanitaria;
- Riscaldamento degli ambienti.

Il contributo delle fonti rinnovabili solari
Ing. Dario Vannini
31 di 89

CORSO CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI  
Ordine e Fondazione Architetti PPC della Provincia di Modena

3 – Gli impianti solari termici □ □ ■ □

### Collettori non vetrati





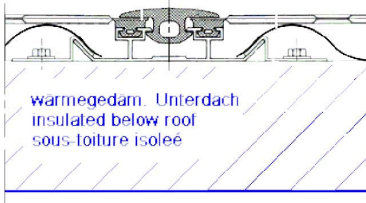
Il contributo delle fonti rinnovabili solari
Ing. Dario Vannini
32 di 89




CORSO CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI  
Ordine e Fondazione Architetti PPC della Provincia di Modena

3 – Gli impianti solari termici


### Collettori non vetrati



warmegeдам. Unterdach  
insulated below roof  
sous-toiture isolée




Condizioni  
ESERCIZIO



- Climi temperati
- Solo stagione calda.

UTILIZZO



- Riscaldamento dell'acqua di piscine scoperte;
- Riscaldamento dell'acqua per docce di stabilimenti balneari, campeggi, alberghi stagionali.

Il contributo delle fonti rinnovabili solari
Ing. Dario Vannini
33 di 89


CORSO CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI  
Ordine e Fondazione Architetti PPC della Provincia di Modena

3 – Gli impianti solari termici

### Serbatoi di accumulo

L'intermittenza nella disponibilità dell'energia solare, sia per l'alternanza giorno/notte, sia per i periodi nuvolosi, sia per l'uso non costante dell'energia captata, richiede l'inserimento nel impianto di captazione di un sistema di accumulo di tale energia. I serbatoi di accumulo si classificano secondo tre criteri fondamentali:

- posizione orizzontale o verticale;
- senza scambiatore o con scambiatore incorporato;
- secondo il materiale impiegato



semplice



Il contributo delle fonti rinnovabili solari
Ing. Dario Vannini
34 di 89

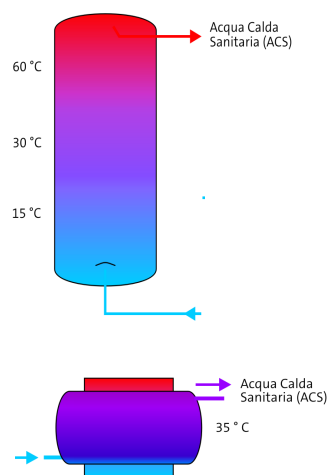
## 3 – Gli impianti solari termici



## Stratificazione della temperatura

Per essere corretta, la forma di un accumulo deve consentire la formazione di una "stratificazione", ovvero che la temperatura dell'acqua si distribuisca verticalmente. Ciò ottimizza il funzionamento dell'impianto.

Il vantaggio principale della stratificazione è che essa permette di prelevare l'acqua calda di consumo dalla parte superiore dell'accumulo. L'acqua che ritorna al collettore è la più fredda, fattore che incrementa l'efficienza del collettore stesso



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

35 di 89

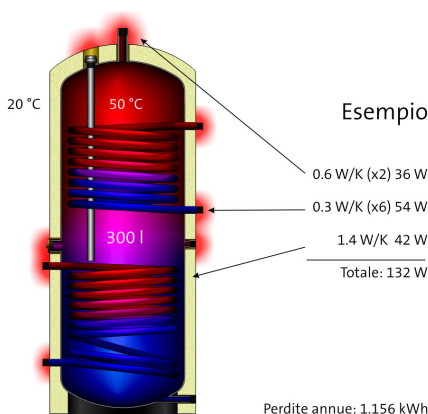
## 3 – Gli impianti solari termici



## Isolamento termico dell'accumulo

In un impianto solare termico, le perdite si verificano soprattutto di notte, attraverso l'accumulo. Proprio per questa ragione è importante che l'accumulo sia dotato di un buon isolamento termico.

In pratica, le principali zone di perdita termica sono quelle riportate nella figura. Ovvero le connessioni delle tubazioni, le coperture metalliche non isolate o un isolamento termico non adeguato.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

36 di 89

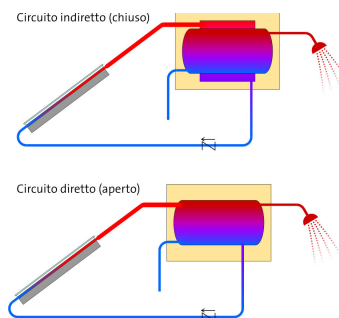
## 3 – Gli impianti solari termici



### Tipi di circuito

Impianti a sistema diretto: in questi impianti il fluido termovettore viene riscaldato direttamente nei collettori solari e il circuito che segue il fluido termovettore è aperto. Ovvero il fluido che circola nei collettori è lo stesso di quello destinato al consumo.

Impianti a sistema indiretto: in questi impianti il fluido che viene riscaldato nei collettori solari non è lo stesso di quello destinato al consumo. Ovvero l'acqua destinata al consumo viene riscaldata indirettamente tramite il fluido termovettore che circola nel lato primario dell'impianto. In sostanza esiste un circuito primario chiuso, che non comunica con il circuito secondario e con il quale scambia unicamente energia termica.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

37 di 89

## 3 – Gli impianti solari termici

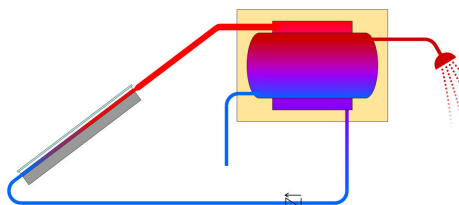


### Configurazione 1: indiretta a circolazione naturale

Questa configurazione è molto diffusa soprattutto per gli impianti piccoli data la sua semplicità, il suo basso costo e la sua semplice manutenzione. Si riscontrano inconvenienti solo quando l'impianto non è stato correttamente progettato.

**Vantaggi:**  
a buon mercato,  
assenza di pompe,  
connessione alla rete elettrica non necessaria.

**Svantaggi:**  
assenza di un sistema di controllo della temperatura massima e pertanto rischio di surriscaldamento.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

38 di 89

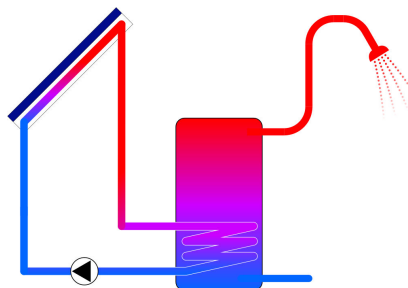
## 3 – Gli impianti solari termici

**Configurazione 2: indiretta a circolazione forzata**

Questa configurazione, pur essendo più cara della prima e con pompa, è ugualmente molto diffusa per gli impianti di piccole e medie dimensioni.

Essa presenta due vantaggi importanti:

- è adatta per essere integrata architettonicamente dato che l'accumulo può essere collocato ovunque, indipendentemente dai collettori, per esempio nello scantinato dell'immobile.
- permette il controllo del surriscaldamento e di utilizzare diversi sistemi antigelo.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

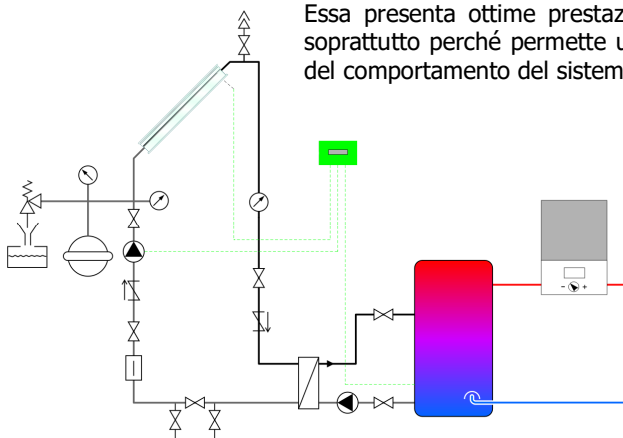
39 di 89

## 3 – Gli impianti solari termici

**Configurazione 3: indiretta a circolazione forzata**

Si tratta della configurazione più frequente per gli impianti medio-grandi.

Essa presenta ottime prestazioni energetiche, soprattutto perché permette un buon controllo del comportamento del sistema.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

40 di 89

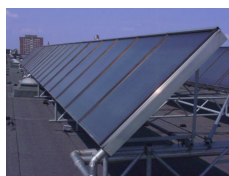
## 3 – Gli impianti solari termici

**Produzione acqua calda sanitaria**

L'applicazione più diffusa degli impianti solari termici è la produzione di acqua calda. Gli ambiti di utilizzo di questa acqua calda sono molto diversi e influiscono sui dettagli tecnici e economici degli impianti.

L'esperienza acquisita negli ultimi anni permette di affermare che il settore domestico, il settore dei servizi (soprattutto alberghi) e le industrie rappresentano i settori suscettibili di realizzare impianti di questo tipo.

L'applicazione principale degli impianti solari termici è rappresentata dal settore che consuma acqua per uso umano (A.C.S.), sia nelle utenze individuali e collettive sia nel settore dei servizi (alberghi, centri sportivi, ospedali ecc.) e industriale (agro-alimentare ecc.). Esistono prototipi di impianti appositamente costruiti per questo tipo di applicazioni.

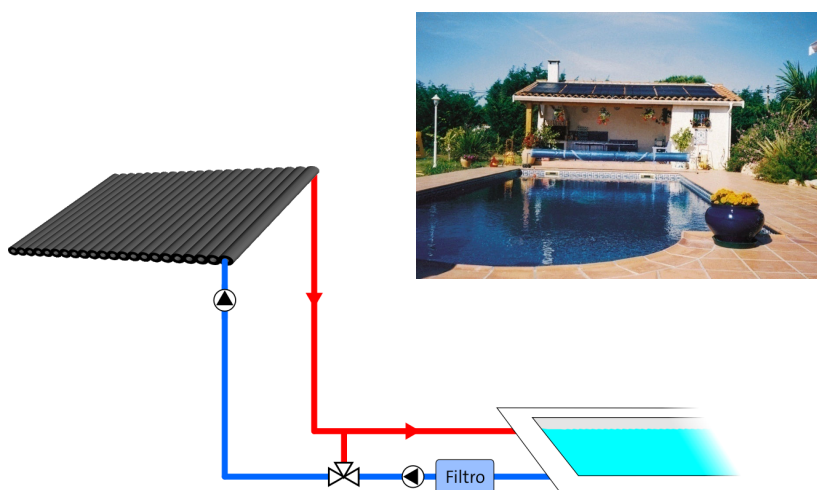


Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

41 di 89

## 3 – Gli impianti solari termici

**Riscaldamento piscine**

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

42 di 89

CORSO CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI  
Ordine e Fondazione Architetti PPC della Provincia di Modena

3 – Gli impianti solari termici

### A.C.S. e riscaldamento piscine

The diagram illustrates a solar thermal system. On the left, a solar collector is connected to a storage tank. A pump (M) circulates the fluid. The storage tank contains a heating coil. The system is connected to a shower head (A.C.S.) and a swimming pool. A filter is located in the pool's circulation loop. The flow is indicated by arrows: blue for the pool loop, purple for the solar collector loop, and red for the A.C.S. loop.

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini 43 di 89

CORSO CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI  
Ordine e Fondazione Architetti PPC della Provincia di Modena

3 – Gli impianti solari termici

### Integrazione riscaldamento – riscaldamento a pavimento

The diagram illustrates a solar thermal system for floor heating. On the left, a solar collector is connected to a storage tank. A pump circulates the fluid. The storage tank contains a heating coil. The system is connected to a shower head (A.C.S.) and a floor heating loop. The flow is indicated by arrows: blue for the pool loop, purple for the solar collector loop, and red for the A.C.S. loop.

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini 44 di 89

CORSO CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI  
Ordine e Fondazione Architetti PPC della Provincia di Modena

3 – Gli impianti solari termici

**Integrazione riscaldamento con due accumuli**

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini 45 di 89

CORSO CALCOLO PRESTAZIONE ENERGETICA EDIFICI  
Ordine e Fondazione Architetti PPC della Provincia di Modena

3 – Gli impianti solari termici

**Solar cooling**

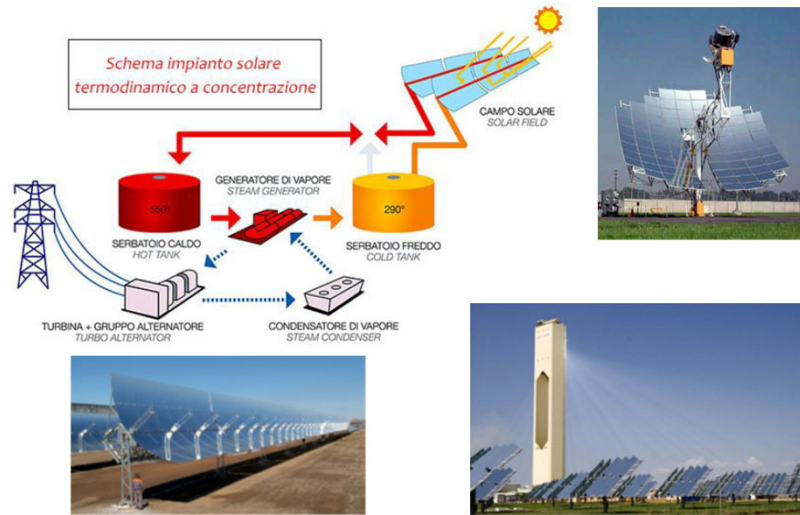
Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini 46 di 89

3 – Gli impianti solari termici



**Solare a concentrazione**



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini 47 di 89

3 – Gli impianti solari termici



**Calcolo secondo la norma UNI/TS 11300-4**

Cfr. file pdf

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini 48 di 89



## INDICE

- Capitolo 1 – Le fonti rinnovabili
- Capitolo 2 – La radiazione solare
- Capitolo 3 – Gli impianti solari termici
- Capitolo 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

49 di 89

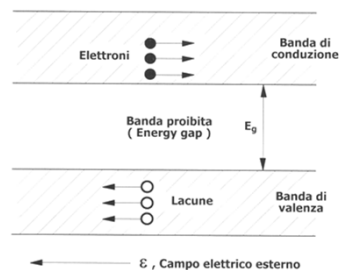
### 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



## Struttura a bande di energia

La banda di energia è l'insieme dei livelli energetici posseduti dagli elettroni ed è composta da:

- una banda di valenza, costituita dall'insieme degli elettroni che hanno un livello energetico basso, tale da restare nei pressi dell'atomo di appartenenza;
- una banda di conduzione, costituita dall'insieme degli elettroni che hanno un livello energetico abbastanza alto, tale da lasciare l'atomo di appartenenza, dando origine a una conduzione di tipo elettrico;
- una banda proibita, costituita dall'insieme dei livelli energetici non consentiti, tra la banda di valenza e la banda di conduzione. L'*energy-gap* (salto energetico) è la quantità di energia necessaria all'elettrone per passare dalla banda di valenza a quella di conduzione.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

50 di 89



**Struttura a bande di energia**

Nei materiali isolanti la banda proibita è molto grande e, di conseguenza, l'*energy-gap* ( $E_g$ ) è elevato; solo pochi elettroni hanno l'energia necessaria per passare nella banda di conduzione, quindi l'isolante non conduce.

Nei materiali conduttori le due bande (valenza e conduzione) sono sovrapposte, eliminando di fatto la banda proibita; la maggior parte degli elettroni possiede già l'energia necessaria per passare nella banda di conduzione e dare origine ad un flusso elettrico.



**Struttura a bande di energia**

Nei materiali semiconduttori la banda proibita è molto piccola e, di conseguenza, l'*energy-gap* è limitato, sarà quindi sufficiente un fotone di energia

$$E_{\text{fot}} \geq E_g$$

per "sbalzare" un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione; tale fenomeno prende il nome di *effetto fotoelettrico*.

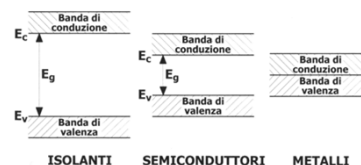


Tabella 3.3. *Energy gap* in diversi semiconduttori

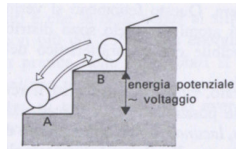
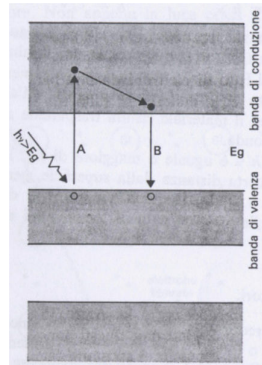
Semiconduttore	Energy gap
Silicio (Si)	1,14 eV
Germanio (Ge)	0,67 eV
Arseniuro di Gallio (GaAs)	1,4 eV
Fosforo di Indio (InP)	1,25 eV
Fosforo di Gallio (GaP)	2,25 eV
Tellurio di Cadmio (CdTe)	1,45 eV
Solfuro di Cadmio (CdS)	2,4 eV

4 – Gli impianti solari fotovoltaici

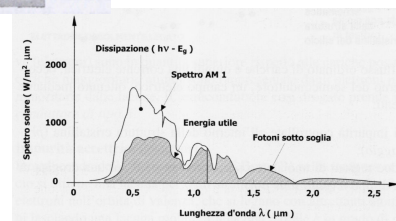


L'effetto fotoelettrico

L'effetto fotoelettrico è dovuto all'emissione di un elettrone da una superficie, solitamente metallica, quando questa viene colpita da un fotone avente una frequenza superiore a un certo valore soglia che dipende dal metallo.



Nello spettro solare la quantità di energia utile per avviare il fenomeno è molto limitata.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

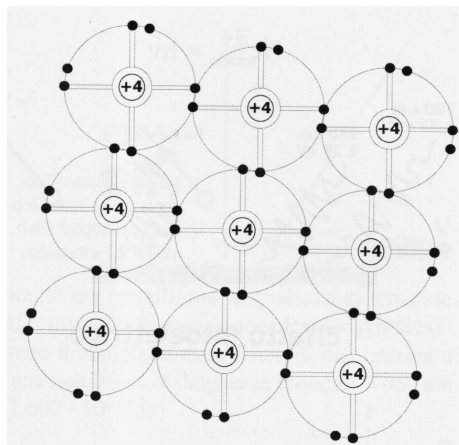
Ing. Dario Vannini 53 di 89

4 – Gli impianti solari fotovoltaici



Coppie elettrone - lacuna

Il silicio cristallino possiede 14 elettroni, quattro dei quali, i più esterni, sono condivisi con altrettanti atomi di silicio legati insieme. Tali legami possono essere spezzati con una quantità di energia sufficiente a far passare gli elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione. L'elettrone si lascia dietro una *lacuna* che verrà tempestivamente colmata da un altro elettrone di un atomo vicino generando così delle coppie elettrone-lacuna.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini 54 di 89

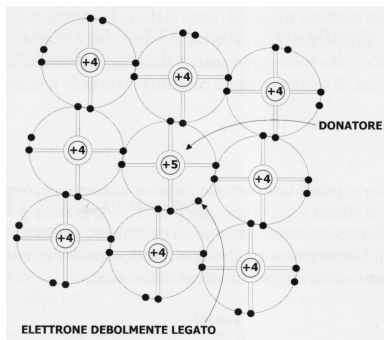
4 – Gli impianti solari fotovoltaici



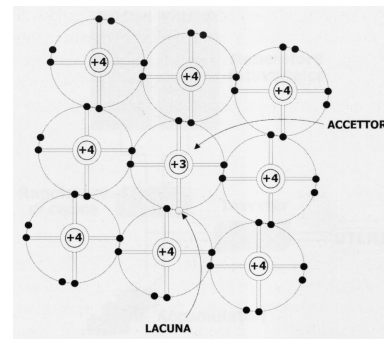
**Drogaggio dei semiconduttori**

La generazione delle coppie elettrone-lacuna avviene in maniera casuale e disordinata. Per generare un flusso ordinato di cariche e quindi una corrente elettrica bisogna immettere delle impurità controllate all'interno della struttura cristallina (*drogaggio*).

Drogaggio tipo n



Drogaggio tipo p



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

55 di 89

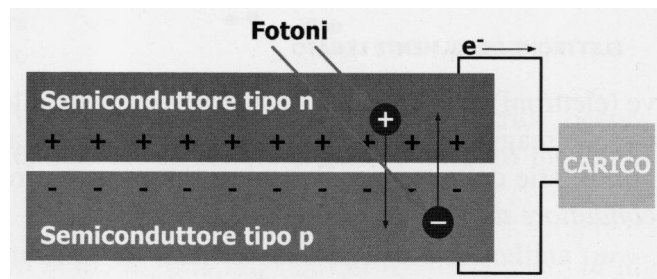
3 – Gli impianti solari fotovoltaici



**Giunzione P - N**

Per generare un campo elettrico e quindi una corrente elettrica ordinata, occorre l'intimo contatto di due strati di silicio p e n (*giunzione p-n*). Una giunzione p-n è costituita da due regioni di uno stesso semiconduttore, di cui una drogata di tipo p e l'altra di tipo n.

L'interazione tra l'effetto fotoelettrico e l'effetto volta (presenza del campo elettrico) dà origine all'effetto fotovoltaico.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

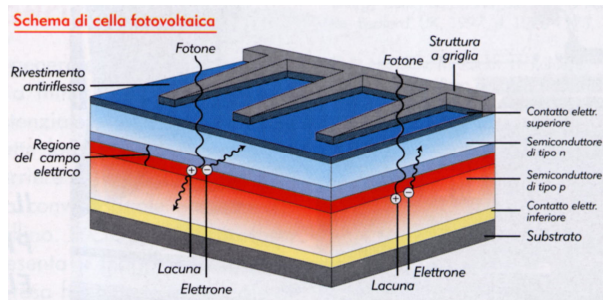
56 di 89

3 – Gli impianti solari fotovoltaici



La cella

La conversione della radiazione solare in una corrente di elettroni avviene nella cosiddetta *cella fotovoltaica*, dispositivo costituito da una sottile fetta (wafer) di materiale semiconduttore, molto spesso silicio. Il silicio è di norma intrinsecamente "drogato", reso cioè impuro mediante l'inserimento di atomi che lo rendano rispettivamente carico positivamente e negativamente.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

57 di 89

3 – Gli impianti solari fotovoltaici



Tipologie di celle

- Celle in silicio cristallino monocristallino
- Celle in silicio policristallino
- Celle in silicio amorfo
- Celle in cristallino/amorfo
- Celle in film sottile
- Celle a matrice organica

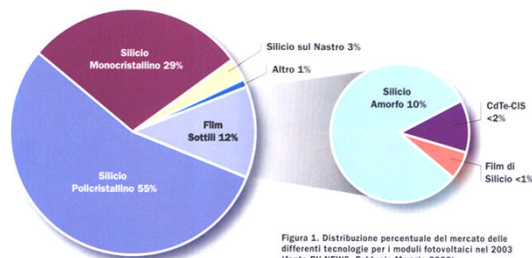
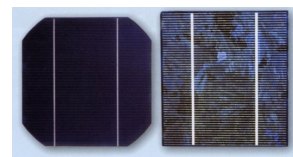


Figura 1. Distribuzione percentuale del mercato delle differenti tecnologie per i moduli fotovoltaici nel 2003 (fonte PV NEWS, Febbraio-Maggio 2003)

Il contributo delle fonti rinnovabili solari






Ing. Dario Vannini

58 di 89

4 – Gli impianti solari fotovoltaici



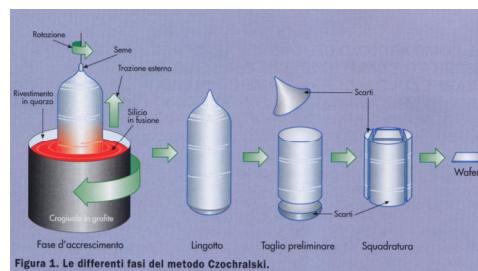
Tipologie di celle

Materiale della cella	Efficienza del modulo	Superficie FV necessaria per 1 kWp
Monocristallino	11–16%	7–9 m <sup>2</sup> 
Policristallino (EFG)	10–14%	8–9 m <sup>2</sup> 
Policristallino	8–10%	9–11 m <sup>2</sup> 
Film sottile in diseleniuro di rame e indio	6–8%	11–13 m <sup>2</sup> 
Amorfo	4–7%	16–20 m <sup>2</sup> 

4 – Gli impianti solari fotovoltaici

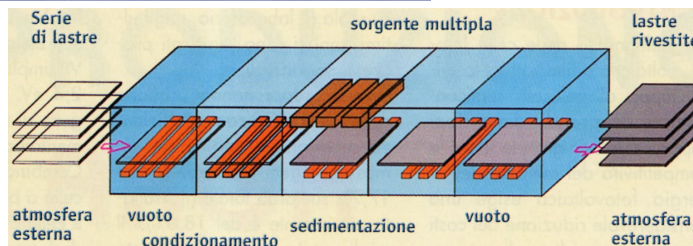


Processi di produzione



Metodo Czochralski per la produzione di celle in silicio monocristallino

Sistema di sedimentazione in linea per celle a film sottile

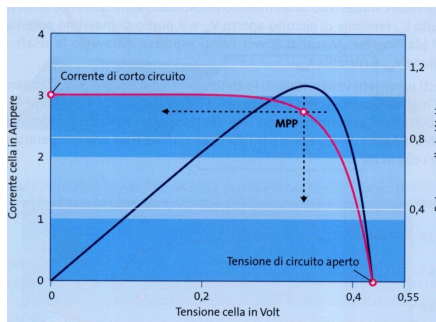


## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



## Proprietà elettriche della cella

Esponendo la cella alla luce invece si genera in ogni caso energia elettrica; se la giunzione è in condizioni di corto circuito ( $V=0$ ) la corrente generata è massima ( $I_{CC}$ ), mentre a circuito aperto sarà massima la tensione che si determina ai due estremi ( $V_{CA}$ ). Dato che la potenza di un generatore è il prodotto della sua tensione per la corrente generata, nei due casi descritti la potenza sarà nulla e dalla curva caratteristica si può individuare il punto in cui il dispositivo fornisce la potenza massima.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

61 di 89

## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



## Proprietà elettriche della cella

La curva caratteristica di una cella dipende da due importanti parametri:

- 1) l'intensità della radiazione luminosa,
- 2) temperatura della cella stessa.

Per una cella in silicio ad esempio, mentre la corrente di corto circuito subisce una variazione trascurabile, la tensione di circuito aperto diminuisce al crescere della temperatura di circa 2,25 mV/°C. Il riscaldamento di una cella FV comporta quindi una diminuzione complessiva delle sue prestazioni.

Per quantificare le prestazioni di una cella FV bisogna riferirsi a delle condizioni precise, note come condizioni standard:

- intensità della radiazione: 1.000 W/m<sup>2</sup>;
- temperatura della cella: 25°C;
- spettro solare: AM1,5.

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

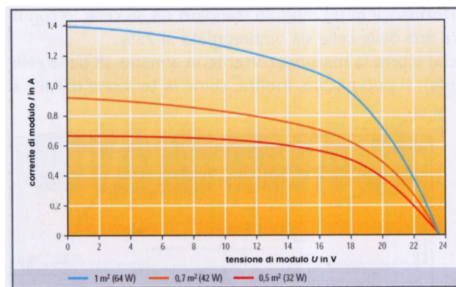
62 di 89

4 – Gli impianti solari fotovoltaici



**Proprietà elettriche della cella**

La curva I-V dei moduli a film sottile risulta meno ripida rispetto a quella dei moduli cristallini e il punto MPP risulta meno definito. Questo tipo di moduli, inoltre, sono caratterizzati da una maggiore flessibilità in termini di dimensioni e forma e, pertanto, i produttori hanno una maggiore libertà nella scelta del numero di celle da collegare e della potenza conseguibile.

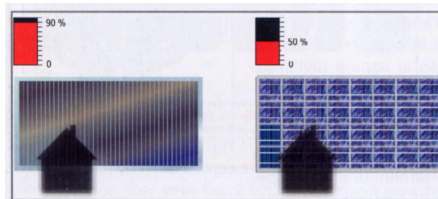


4 – Gli impianti solari fotovoltaici

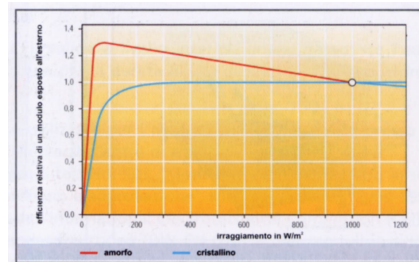


**Proprietà elettriche della cella**

Rispetto ai moduli in silicio cristallino, nei quali il completo ombreggiamento di una cella generalmente porta alla non produttività di metà del modulo, nei moduli in film sottile la potenza si riduce proporzionalmente all'area realmente ombreggiata.



Tali moduli assorbono la luce visibile a onde corte e medie in modo più efficiente rispetto ai moduli cristallini, specialmente in condizioni di minor irraggiamento. Inoltre gli effetti dell'aumento di temperatura sono meno vistosi.



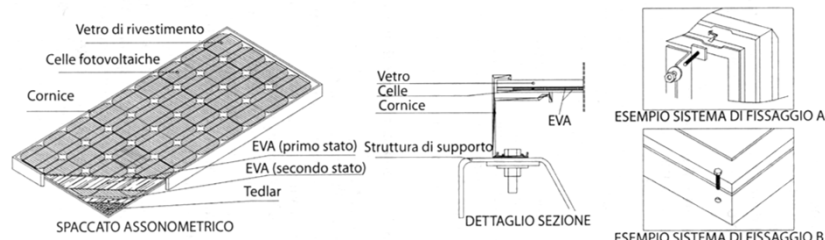


## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



## Dalla cella al modulo

I moduli in commercio attualmente più diffusi (con superficie attorno a 0,5 m<sup>2</sup>), che utilizzano celle al silicio mono e policristallino, prevedono tipicamente 36 celle collegate elettricamente in serie.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

65 di 89

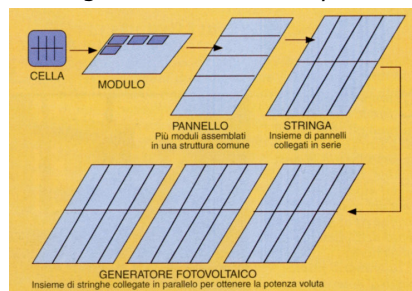
## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



## Dal modulo al generatore

Il modulo rappresenta il componente elementare di qualsiasi tipo di sistema fotovoltaico. Un insieme di moduli, collegati elettricamente in serie in modo da fornire la tensione richiesta, costituisce una *stringa*. Più stringhe collegate generalmente in parallelo, per fornire la potenza richiesta, costituiscono il *generatore fotovoltaico*.

Gruppi di moduli fotovoltaici montati su una stessa struttura di sostegno costituiscono un *pannello*.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

66 di 89

## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



### Tipologie di impianti fotovoltaici

Le tipologie di pannello che si possono utilizzare per comporre un impianto fotovoltaico si possono suddividere in due categorie. La prima è quella detta della "prima generazione" di pannelli della quale fanno parte i pannelli fotovoltaici che hanno celle solari in silicio monocristallino, policristallino ed amorfo mentre l'altra è detta "seconda generazione" di pannelli della quale fanno parte i pannelli fotovoltaici in film sottile che necessitano di una minore quantità di silicio e che quindi hanno un costo più contenuto.

Le principali tipologie di pannello sono:

- monocristallino / policristallino
- silicio amorfo
- CIS
- CIGS

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

67 di 89

## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



### Mono / policristallini – Silicio amorfo

I moduli fotovoltaici **monocristallini** e **policristallini** formati da 30-70 celle affiancate. Il rendimento di un pannello solare in silicio monocristallino è di circa il 13-17 % mentre quello di un pannello solare in silicio policristallino è di circa il 12-14%. Per produrli viene spesa molta energia, e quindi ogni modulo impiega dai 3 ai 6 anni per restituire l'energia che è stata impiegata per essere prodotto.



I moduli in **silicio amorfo** sono i più economici ed anche quelli che presentano la resa minore. Il rendimento di questi pannelli fotovoltaici va dal 6% al 10 % circa, ma, nei primi due mesi di vita, il rendimento diminuisce di circa il 20 %, per poi rimanere stabile. Per produrre questi moduli viene speso un quantitativo abbastanza basso di energia che viene recuperata in circa 2-3 anni.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

68 di 89

4 – Gli impianti solari fotovoltaici



**CIS - CIGS**

I moduli **CIS** sono composti da diseleniuro di indio e rame. Hanno un'efficienza di circa il 12-13%. Essi sono capaci di assorbire un vasto spettro di luce ed offrire una notevole potenza sviluppata anche in condizioni meteo non proprio ottimali.



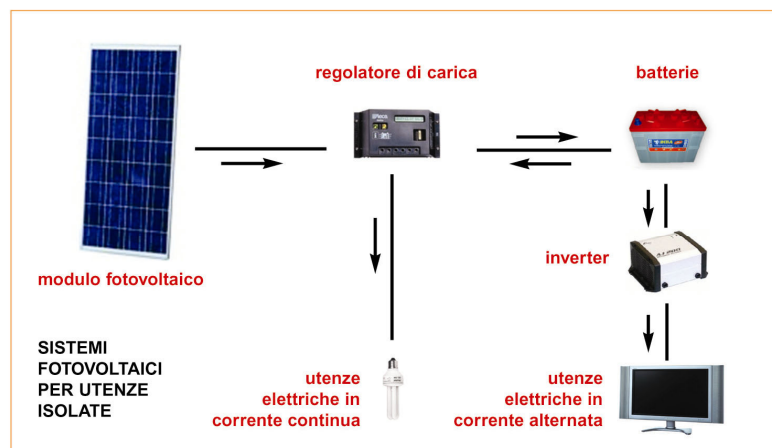
I moduli **CIGS** sono composti da rame, indio, gallio e selenio che permettono di coprire l'intero spettro solare e quindi assorbire più radiazione solare rispetto agli altri pannelli. Le prestazioni rimangono invariate nel tempo ed hanno un'efficienza di circa 13-19%.



4 – Gli impianti solari fotovoltaici



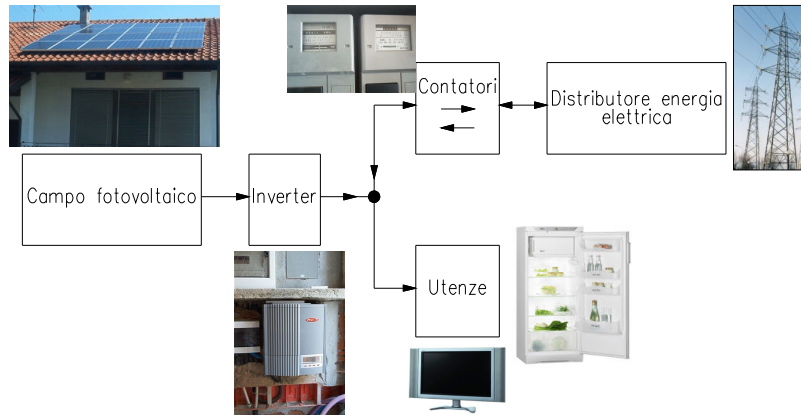
**Sistemi isolati (stand – alone)**



4 – Gli impianti solari fotovoltaici



**Sistemi connessi alla rete elettrica (grid – connected)**



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

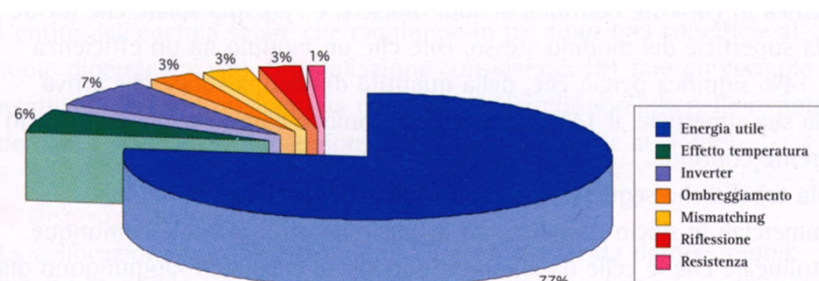
71 di 89

4 – Gli impianti solari fotovoltaici



**Efficienza di conversione del sistema (BOS)**

L'efficienza di conversione del BOS (cioè della restante parte del sistema) è il rapporto tra l'energia elettrica disponibile in corrente alternata alle utenze (energia utile) e l'energia elettrica in corrente continua ai morsetti di un modulo. L'efficienza del BOS (anche indicata come PR, Performance Ratio) è determinata da molti fattori e raggiunge solitamente il 75-85%.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

72 di 89

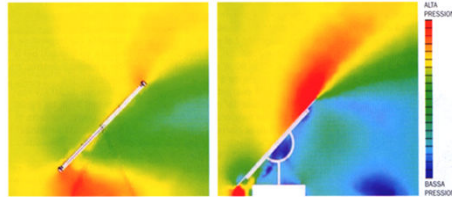
## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



## Sistemi ad inseguimento

Il sistema di regolazione della posizione può essere di tipo elettrico o di tipo termoidraulico.

Sono decisamente più costosi dei sistemi tradizionali, presentano maggiori oneri di manutenzione e sono più esposti all'instabilità ed ai differenziali di pressione



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

73 di 89

## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



## Retrofit e integrati

Le installazioni sono di due tipi:

- **retrofit:** i moduli sono installati sulla struttura già esistente mediante supporti metallici e hanno l'unica funzione di generare energia
- **integrati:** i pannelli vanno a sostituire componenti dell'edificio diventando parte integrante di esso e devono quindi soddisfare i requisiti dell'elemento che vanno a sostituire

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

74 di 89

## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



### Montaggio su coperture inclinate

#### RETROFIT

I moduli vengono montati con strutture metalliche sul rivestimento del tetto; è il sistema più economico, ma non sempre è gradevole l'aspetto estetico.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

75 di 89

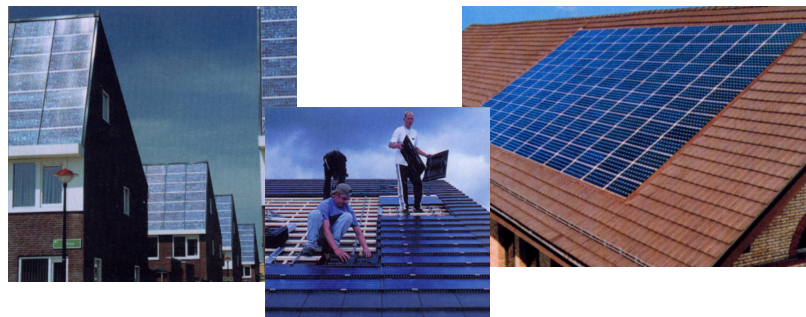
## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



### Montaggio su coperture inclinate

#### INTEGRATI

I pannelli solari vanno a sostituire tutto, o parte, del rivestimento del tetto, giacendo nello stesso piano di quest'ultimo.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

76 di 89

## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici

**Montaggio su coperture piane****RETROFIT**

I moduli vengono montati su supporti metallici appoggiati alla struttura del tetto già esistente.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

77 di 89

## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici

**Montaggio su coperture piane****INTEGRATI**

L'angolo di inclinazione dei pannelli è spesso molto ridotto: questo comporta un minor irraggiamento complessivo ed una minore efficienza. Altro inconveniente è l'incapacità del sistema di mantenersi pulito autonomamente.



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

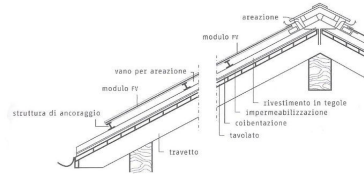
78 di 89

4 – Gli impianti solari fotovoltaici

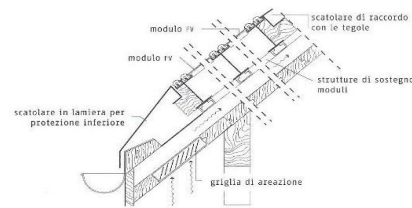


**Montaggio sul tetto**

Sistema di montaggio retrofit su tetto inclinato



Sistema di montaggio integrato su tetto inclinato



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

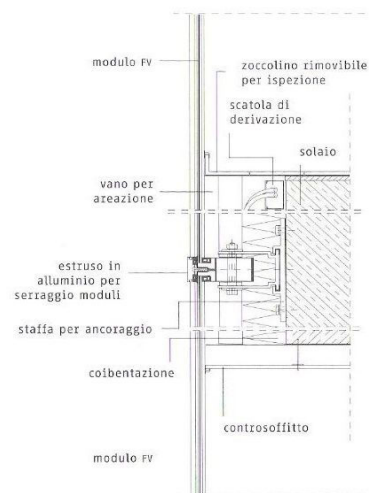
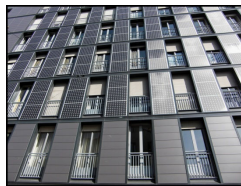
Ing. Dario Vannini

79 di 89

4 – Gli impianti solari fotovoltaici



**Montaggio sulle facciate**



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

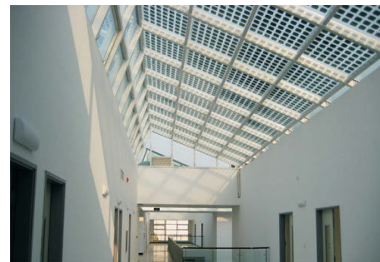
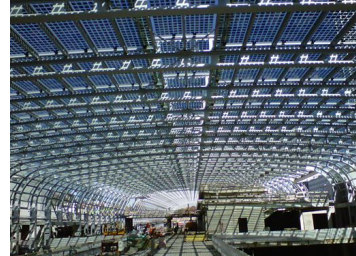
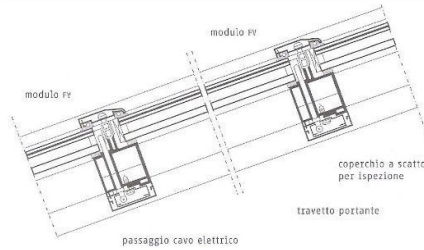
80 di 89



4 – Gli impianti solari fotovoltaici



Montaggio su coperture in vetro



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

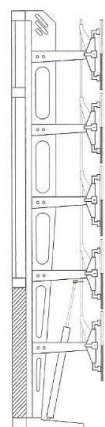
81 di 89

4 – Gli impianti solari fotovoltaici

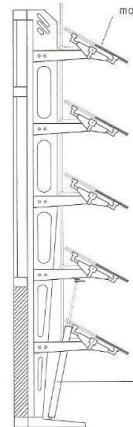


Montaggio su sistemi di ombreggiamento

posizione di massima protezione della luce

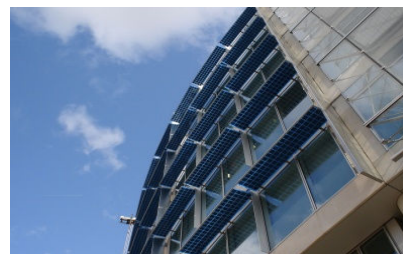


posizione di massima illuminazione interna



modulo PV

impianto idraulico per la regolazione del sistema frangisole



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

82 di 89

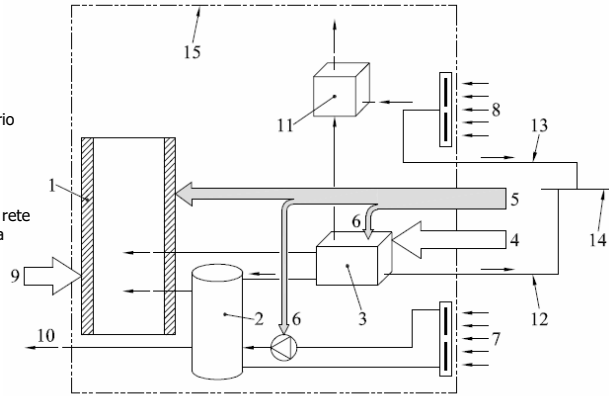
4 – Gli impianti solari fotovoltaici



Energia prodotta mensilmente dall'impianto FV

Legenda:

- 1 – utilizzatore (fabbisogno di energia termica)
- 2 – accumulatore
- 3 – generatore
- 4 – vettore energetico primario
- 5 – E elettrica
- 6 – E per ausiliari
- 7 – collettori solari termici
- 8 – pannelli fotovoltaici
- 9 – E termica utile fornita da rete
- 10 – E termica utile esportata
- 11 – sistema di dissipazione del calore
- 12 – E elettrica esportata da cogenerazione
- 13 – E elettrica esportata da fotovoltaico
- 14 – rete elettrica pubblica
- 15 – confine del sistema



Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

83 di 89

4 – Gli impianti solari fotovoltaici



Energia prodotta mensilmente dall'impianto FV

L'energia elettrica prodotta mensilmente dal sistema fotovoltaico è data da:

$$E_{el,pv,out} = (E_{pv} \times W_{pv} \times f_{pv}) / I_{ref} \text{ [kWh]}$$

dove:

$E_{pv}$  è l'irradiazione solare mensile incidente sull'impianto fotovoltaico [kWh/m<sup>2</sup>];

$W_{pv}$  è la potenza di picco, che rappresenta la potenza elettrica di un impianto fotovoltaico di una determinata superficie, per una irradianza di 1 kW/m<sup>2</sup> su questa superficie (a 25 °C);

$f_{pv}$  è il fattore di efficienza del sistema che tiene conto dell'efficienza dell'impianto fotovoltaico integrato nell'edificio e dipende dall'impianto di conversione da corrente continua a corrente alternata, dalla temperatura operativa reale dei moduli fotovoltaici e dall'integrazione nell'edificio dei moduli stessi (vedere prospetto 10);

$I_{ref}$  è l'irradianza solare di riferimento pari a 1 kW/m<sup>2</sup>.

Valori del fattore di efficienza  $f_{pv}$

Grado di ventilazione dei moduli fotovoltaici	$f_{pv}$ [-]
Moduli non ventilati	0,70
Moduli moderatamente ventilati	0,75
Moduli molto ventilati o con ventilazione forzata	0,80

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

84 di 89

## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



### Potenza di picco dell'impianto

La potenza di picco  $W_{pv}$  si ottiene in condizioni di prova. Se tale valore non è disponibile può essere calcolato come:

$$W_{pv} = K_{pv} \times A_{pv} \text{ [kW]}$$

dove:

$K_{pv}$  è il fattore di potenza di picco che dipende dal tipo di modulo fotovoltaico installato. I valori di  $K_{pv}$  sono riportati nel prospetto 11 [kW/m<sup>2</sup>];

$A_{pv}$  è la superficie di captazione dell'impianto fotovoltaico, al netto del telaio [m<sup>2</sup>].

Valori del fattore di potenza di picco  $K_{pv}$

Tipo di modulo fotovoltaico	$K_{pv}$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Silicio mono cristallino	0,150
Silicio multi cristallino	0,130
Film sottile di silicio amorfo	0,060
Altri strati di film sottile	0,035
Film sottile di diseleniuro di indio-rame-gallio (CIGS)	0,105
Film sottile di telluro di cadmio (CdTe)	0,095

## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



### Efficienza del modulo

L'efficienza del modulo si può calcolare così:

$$\eta_{\text{mod}} = \frac{P_{\text{modulo}}}{1000 A_{\text{modulo}}}$$

dove:

- $P_{\text{modulo}}$  è la potenza all'uscita del modulo espressa in W;
- $A_{\text{modulo}}$  è l'area del modulo espressa in m<sup>2</sup>;

Il fattore moltiplicativo 1000 sta ad indicare che i test sui pannelli vengono eseguiti considerando un irraggiamento di 1000 W/m<sup>2</sup>.

## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



### Calcolo di Esol semplificato

Ad es. a Bologna in Gennaio su superficie orizzontale si ha:  
 $E_{sol,h}=2,5+2=4,5$  MJ/m<sup>2</sup>d=1,25 kWh/m<sup>2</sup>d  
 Poiché Gennaio ha 31 giorni  $E_{sol,h}=31*1,25=38,75$  kWh/m<sup>2</sup>

Ripetendo i conti per tutti i 12 mesi si ottiene la radiazione solare annuale che arriva su superficie orizzontale a Bologna.  
 $E_{sol,h}=1429$  kWh/m<sup>2</sup> anno

#### Correzione per inclinazione (tilt)

Ad es. a Bologna (1200 kWh/m<sup>2</sup> anno) un pannello inclinato di 30° sull'orizzontale esposto a sud raccoglie in Gennaio:

$E_{sol}=1429*1,11=1586$  kWh/m<sup>2</sup> anno

Tabella1. Fattore di inclinazione ed orientamento per località aventi radiazione annuale pari a 1300 kWh/m<sup>2</sup>anno

Angolo inclinazione rispetto all'orizzontale	Orientamento				
	Ovest	Sud-Ovest	Sud	Sud-Est	Est
	Valore del fattore di inclinazione				
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
15°	0,99	1,06	1,08	1,06	0,99
30°	0,97	1,08	1,11	1,08	0,97
45°	0,93	1,06	1,06	1,06	0,93
60°	0,87	1,00	1,01	1,00	0,87
90°	0,70	0,77	0,74	0,77	0,70

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

87 di 89

## 4 – Gli impianti solari fotovoltaici



### Calcolo energia elettrica prodotta

Se si ipotizza di aver installato a Bologna (30° di inclinazione, orientamento SUD) 10 m<sup>2</sup> di moduli fotovoltaici in silicio monocristallino ( $P_{pk}=0,14$ ) con inverter ad elevata efficienza ( $f_p=0,8$ ), l'energia elettrica producibile risulta:

$$E_{el} = AE_{sol} K_{pk} f_p \frac{1}{I_{ref}} \left[ \frac{kWh}{anno} \right]$$

$E_{el}=10*1586*0,14*0,8/1=1776,2$  kWh/anno  
 ( $I_{ref}=1$  kW/m<sup>2</sup>)

Il calcolo non prevede **ombreggiamenti!**

La UNI 10349 sovrastima l'irraggiamento solare.

Il metodo approssimato è quello previsto dalla Regione ER per calcoli sulla certificazione energetica degli edifici.

Il contributo delle fonti rinnovabili solari

Ing. Dario Vannini

88 di 89



*Grazie  
per  
l'attenzione...*

*...e restiamo in contatto!*



**Ing. Dario Vannini**  
vannini.studio@gmail.com



Questa presentazione è messa a disposizione sulla base dei termini della licenza Creative Commons Public License; Attribuzione – Non commerciale – Non opere derivate 2.5 Versione italiana