

Solare termico e fotovoltaico

Corso di Impianti Termotecnici e riqualificazione energetica

Marco Manzan

Università di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura

maggio 2021

Pompe di calore

La specifica consente di determinare:

- il fabbisogno mensile dei vettori energetici dei sottosistemi di generazione con pompa di calore per riscaldamento e ACS
- la quota di fabbisogno di energia a carico di sistemi di integrazione

La specifica si applica a:

- pompe di calore a compressione di vapore azionate da motore elettrico
- pompe di calore ad assorbimento
- per pompe di calore azionate da motopori endotermici da alcune indicazioni sui dati da richiedere per effettuare il calcolo

Classificazione per fonte di energia

| Fonte di energia | Tipologia fonte di energia sfruttata | Modalità di estrazione |
|--|---|--|
| Aria esterna | Rinnovabile "aerotermica" | Raffreddamento e deumidificazione dell'aria esterna |
| Aria interna | Non rinnovabile se proveniente da sistemi impieganti energie fossili, ad esclusione dell'aria di espulsione | Raffreddamento e deumidificazione dell'aria interna di espulsione in sistemi di recupero |
| Roccia | Rinnovabile "geotermica" | Raffreddamento del sottosuolo |
| Terreno | Rinnovabile "geotermica" | Raffreddamento del sottosuolo |
| Acqua di falda | Rinnovabile "geotermica" | Raffreddamento del sottosuolo |
| Acqua di mare | Rinnovabile "idrotermica" | Raffreddamento acque superficiali |
| Acqua di lago | Rinnovabile "idrotermica" | Raffreddamento acque superficiali |
| Acqua di fiume | Rinnovabile "idrotermica" | Raffreddamento acque superficiali |
| Acque di risulta e liquami di processi tecnologici | Non rinnovabile | Raffreddamento acque e/o liquami di processo |
| Liquami urbani | Assimilabile a rinnovabile | Raffreddamento liquami urbani |

Pompe di calore

Condizioni di riferimento per i dati prestazionali forniti dal fabbricante. Pompe di calore per solo riscaldamento o funzionamento combinato

| Sorgente fredda | Temperatura sorgente fredda | | | | Temperatura pozzo caldo riscaldamento ad aria | Temperatura pozzo | | | Tpozzo caldo | |
|-----------------|-----------------------------|---|----|----|---|-------------------|----|----|--------------|----|
| | -7 | 2 | 7 | 12 | | 35 | 45 | 55 | 45 | 55 |
| Aria | | | | | 20 | 35 | 45 | 55 | 45 | 55 |
| Acqua | | 5 | 10 | 15 | 20 | 35 | 45 | 55 | 45 | 55 |
| Terreno/roccia | -5 | 0 | 5 | 10 | 20 | 35 | 45 | 55 | 45 | 55 |

Prestazioni a pieno carico in condizioni diverse

Rendimento di secondo principio

- si definisce il rendimento di secondo principio il rapporto tra COP e massimo teorico COP_{max}

$$COP_{max} = \frac{T_c}{T_c - T_f} = \frac{\theta_c + 273,15}{\theta_c - \theta_f}$$

θ_c temperatura sorgente fredda

θ_f temperatura pozzo caldo

- si interpola il rendimento di secondo principio

$$\eta_{||,1} = \frac{COP_1}{\frac{\theta_{c,1} + 273,15}{\theta_{c,1} - \theta_f}}$$

$$\eta_{||,2} = \frac{COP_2}{\frac{\theta_{c,2} + 273,15}{\theta_{c,2} - \theta_f}}$$

$$\eta_{||,x} = \eta_{||,1} + (\eta_{||,2} - \eta_{||,1}) \times (\theta_{c,x} - \theta_{c,1}) / (\theta_{c,2} - \theta_{c,1})$$

$$COP_x = \eta_{||,x} \times (\theta_{c,x} + 273,15) / (\theta_{c,x} - \theta_f)$$

Prestazioni a pieno carico in condizioni diverse

Potenza e COP

temperatura intermedia sorgente fredda

- COP, interpolazione lineare del rendimento di secondo principio
- potenza utile: interpolazione lineare in funzione della temperatura della sorgente fredda

temperatura intermedia sorgente calda

- COP, interpolazione lineare del rendimento di secondo principio
- potenza utile: interpolazione lineare in funzione della temperatura della sorgente calda

Prestazioni a carico ridotto

Le prestazioni della pompa devono essere corrette

- in base ai dati forniti dal fabbricante
- in base a modelli di calcolo di default

Se mancano i dati forniti dal fabbricante si utilizza:

potenza fissa regolazione On/Off

- Pompe aria/aria, antigelo/aria, acqua/aria

$$COP_{A,B,C,D} = COP_{DC} \times [1 - C_d \times (1 - CR)]$$

- Pompe aria/acqua, antigelo/acqua, acqua/acqua (UNI EN 14825)

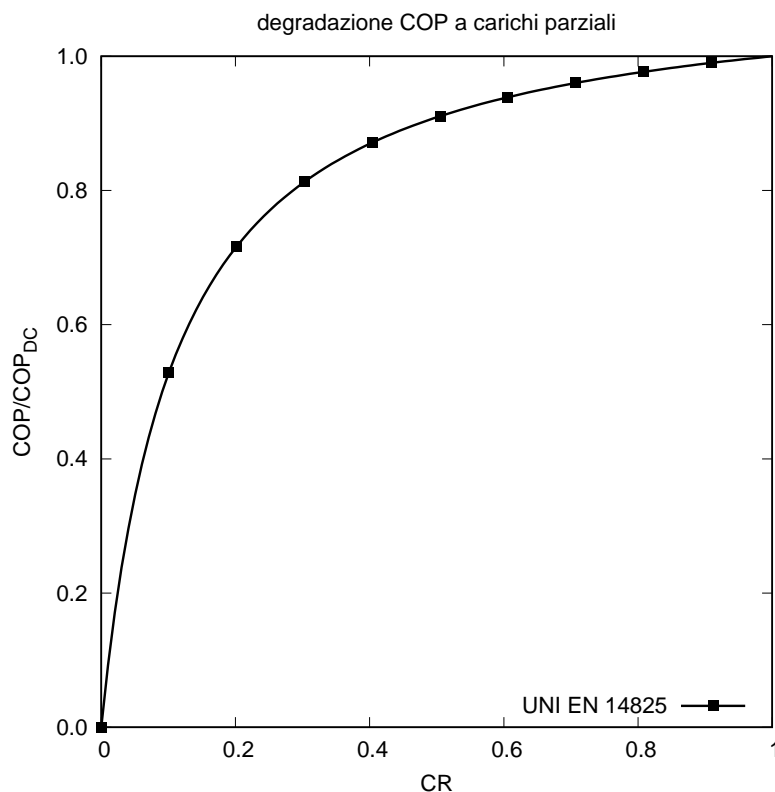
$$COP_{A,B,C,D} = COP_{DC} \times \frac{CR}{C_c \times CR + (1 - C_c)}$$

C_c Fattore di correzione dichiarato, altrimenti 0,9

C_d Fattore di correzione dichiarato, altrimenti 0,25

CR Fattore di carico macchina

Pompe aria/acqua, antigelo/acqua, acqua/acqua



L'intervallo di calcolo è il mese, ma solitamente viene suddiviso in intervalli di durata minore definiti bin. La suddivisione viene fatta per

scelta dell'intervallo di calcolo

| Sorgente fredda | Pozzo caldo | | |
|---|-------------|------------------------------|-------------------------------|
| | Aria | Acqua a temperatura costante | Acqua a temperatura variabile |
| Aria esterna | Bin mensili | Bin mensili | Bin mensili |
| Aria interna (recupero) a temperatura dipendente dalle condizioni climatiche | Bin mensili | Bin mensili | Bin mensili |
| Aria interna (recupero), temperatura indipendente dalle condizioni climatiche | Mese | Mese | Mese |
| Terreno/roccia climaticamente perturbato | Mese | Mese | Mese |
| Terreno/roccia climaticamente non perturbato | Mese | Mese | Mese |
| Acqua di mare, di fiume, di lago | Mese | Mese | Mese |
| Acqua di risulta e liquami di processi tecnologici | Mese | Mese | Mese |
| Liquami urbani | Mese | Mese | Mese |

BIN

- intervallo di temperatura $\Delta\theta_{bin} = 1 \text{ K}$
- centrato su valori interi di temperatura
- Temperatura minima $\theta_{bin,low} = \theta_{bin} - \Delta\theta_{bin}/2$
- Temperatura massima $\theta_{bin,up} = \theta_{bin} + \Delta\theta_{bin}/2$
- $t_{bin,mese}$ numero di ore con temperatura compresa nell'intervallo di definizione del bin considerato

Tipologie di impianti con ausiliari interni o esterni

| Sorgente fredda | Estrazione energia da sorgente fredda | Ausiliari esterni di estrazione |
|---|--|--|
| Aria Integrata nel sistema. | Il COP comprende il fabbisogno di energia elettrica per l'estrazione. | Circuito canalizzato ausiliario con proprio ventilatore. Il fabbisogno elettrico è da considerare separatamente. |
| Acqua/miscela acqua - fluido anticongelante | Nel COP della pdc è compresa solo la potenza elettrica assorbita per compensare le perdite di carico nell'evaporatore. | Circuito idraulico ausiliario con propria pompa: il fabbisogno elettrico deve essere considerato separatamente. Circuito idraulico che sfrutta la pompa a corredo della macchina: deve essere considerato separatamente il fabbisogno per compensare le sole perdite di carico del circuito esterno. |
| Terreno/roccia | Integrata nel sistema (espansione diretta). Il COP comprende il fabbisogno di energia elettrica per l'estrazione. | Non presenti. |

Temperature limite di funzionamento

Si deve tener conto delle temperature limite

$\theta_{H,off}$ temperatura alla quale la pompa viene disattivata dal sistema di controllo, temperatura di bilanciamento default 20 °

$\theta_{w,off}$ temperatura alla quale la pompa viene disattivata dal sistema di controllo, ACS compresa tra 45 e 65 °

TOL temperatura limite funzionamento sorgente fredda, imposta dal fabbricante

$\theta_{H,cut-off,min}$ dato progettuale, temperatura alla quale si disattiva la pompa di calore

$\theta_{H,cut-off,max}$ temperatura di disattivazione del pozzo caldo

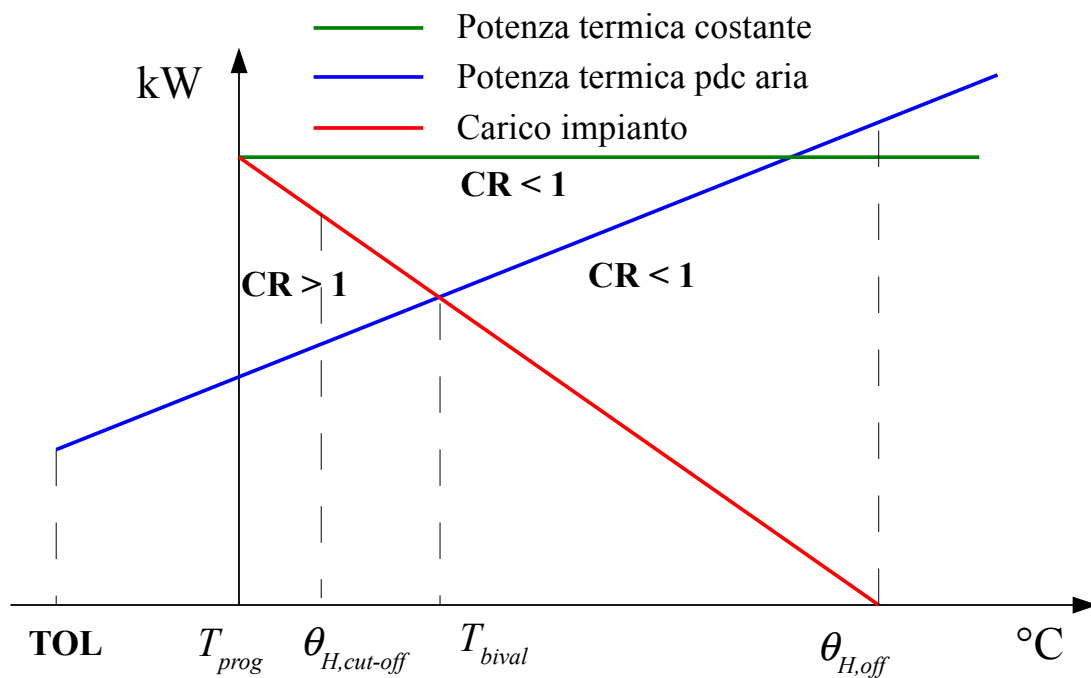
deve essere valutato il dimensionamento della pompa di calore in funzione del carico termico dell'edificio

- Ⓐ la pompa copre tutto il carico termico
- Ⓑ copre solo parzialmente il carico, integrazione mediante resistenza elettrica o altro generatore integrato
- Ⓒ inserita in un impianto dove è prevista la presenza di un generatore aggiuntivo

La pompa nei casi B e C funziona in modalità bivalente, la temperatura alla quale $CR = 1$ è chiamata *temperatura bivalente*

Funzionamento alla temperatura bivalente

- 1 funzionamento alternato: la pompa di calore viene disattivata al raggiungimento della temperatura bivalente e viene attivato il generatore di integrazione che fornisce tutta la potenza termica fino al carico di progetto;
- 2 funzionamento parallelo: la pompa di calore non viene disattivata al raggiungimento della temperatura bivalente e viene attivato il generatore di integrazione che fornisce la quota residua di potenza termica;
- 3 funzionamento parzialmente parallelo: la pompa di calore non viene disattivata al raggiungimento della temperatura bivalente e per temperature maggiori viene attivato il generatore di integrazione che deve fornire la potenza residua. Alla temperatura $\theta_{H,cut-off,min}$ la pompa di calore viene disattivata e tutta la potenza termica richiesta deve essere fornita dal generatore di integrazione.



Pompe di Calore Valutazioni di calcolo

Fabbisogno di energia termica utile

La suddivisione del fabbisogno in bin viene effettuata in diversi passi:

- ① calcolo gradi/ora $GH_{bin,mese} = t_{bin,mese,ON} \times (\theta_{H,off} - \theta_{bin})$ scartando i bin a temperatura maggiore di $\theta_{H,off}$
- ② si calcola l'energia per riscaldamento per ciascun bin

$$Q_{H,hp,out,bin} = Q_{H,hp,out} \times \frac{GH_{bin,mese}}{\sum GH_{bin,mese}} \text{ [Wh]}$$

- ③ si calcola la potenza richiesta nel bin

$$\Phi_{H,hp,out,bin} = \frac{Q_{H,hp,out,bin}}{t_{bin,mese,H}} \text{ [W]}$$

- Si determina la temperatura del pozzo caldo
- si distingue tra acqua ed aria
- si determina la potenza massima della pompa di calore per le temperature ricavate
- si calcola il fattore di carico della macchina

$$CR = \frac{\Phi_{H, hp, out, bin}}{\Phi_{bin, max, H}}$$

Casi possibili

- 1 $CR > 1$ e $\theta_f > \theta_{cut-off, min}$ funzionamento a pieno carico, ma non sufficiente a coprire il carico
- 2 $CR = 1$ funzionamento a pieno carico, sufficiente a coprire il carico
- 3 $CR < 1$ funzionamento parzializzato sufficiente, a coprire il carico
- 4 $\theta_f < \theta_{cut-off, min}$, pompa di calore disattivata
- 5 $\theta_f \leq TOL$, pompa di calore disattivata

PDC, Calcolo dell'energia

$$CR < 1, \theta_f > \theta_{cut-off}$$

- , funzionamento parzializzato, correzione COP'

$$COP = f_{corr,COP} \times COP'$$

- produzione energia utile pompa

$$Q_{HP,out,bin(j)} = (\Phi_{H,hp,max,bin(j)} \times t_{h,H,bin(j)}) \times CR(j)$$

- fabbisogno di energia

$$Q_{HP,p,hp,out,bin(j)} = \frac{(\Phi_{H,hp,max,bin(j)} \times t_{h,H,bin(j)}) \times CR(j)}{COP(j)}$$

- fabbisogno ausiliari elettrici

$$Q_{HP,hp,aux,out,bin(j)} = W_{H,hp,aux} \times t_{h,H,bin(j)} \times CR(j)$$



PDC, Calcolo dell'energia

$$CR > 1, \theta_f > \theta_{cut-off}$$

- funzionamento pieno carico, correzione $COP = COP'$
- produzione energia utile pompa

$$Q_{HP,out,bin(j)} = (\Phi_{H,hp,max,bin(j)} \times t_{h,H,bin(j)})$$

- fabbisogno di energia

$$Q_{HP,p,hp,out,bin(j)} = \frac{(\Phi_{H,hp,max,bin(j)} \times t_{h,H,bin(j)})}{COP'(i)}$$

- fabbisogno ausiliari elettrici

$$Q_{HP,hp,aux,out,bin(j)} = W_{H,hp,aux} \times t_{h,H,bin(j)}$$

- energia termica integrazione

$$Q_{H,d,int,bin(j)} = Q_{H,d,inbin(j)} - Q_{H,hp,out,bin(j)}$$



| | | A T_{bival} | B | C | D |
|-------------------------------|--------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Temperature di riferimento | -10 °C | -7 °C | 2 °C | 7 °C | 12 °C |
| PLR ($T_{des} = -10^\circ$) | 100% | 88% | 54% | 35% | 15% |
| Potenza DC a pieno carico | | $DCA = DC_{bival}$ | DC_B | DC_C | DC_D |
| COP a carico parziale | | COP_A | COP_B | COP_C | COP_D |
| COP a pieno carico | | COP'_A | COP'_B | COP'_C | COP'_D |
| CR | > 1 | 1 | $(0, 54P_{des})/DC_B$ | $(0, 35P_{des})/DC_C$ | $(0, 15P_{des})/DC_D$ |
| Fattore correttivo F_p | 1 | 1 | COP_B/COP'_B | COP_C/COP'_C | COP_D/COP'_D |

- PLR part load ratio ossia fattore di carico climatico.
- CR fattore di carico della pompa di calore.
- DC potenza a pieno carico alle temperature indicate.
- DC_{bival} potenza a pieno carico a -7/35 °C.
- $P_{designh}$ a pieno carico con clima A.
- COP' COP a carico CR alle stesse condizioni di temperatura di COP' .
- COP' COP a pieno carico alle stesse condizioni di temperatura di COP .

Procedura di calcolo

- Si determina la potenza termica alla temperatura di progetto assumendo $CR = 1$ alla temperatura bivalente e 16 ° la temperatura di annullamento del carico

$$P_{designh} = \frac{DC_{biv}}{PLR} = DC_{biv} \frac{T_{des} - 16}{T_{bival} - 16}$$

- calcolare i fattori di carico CR nelle quattro condizioni A, B, C, D

$$CR(j) = \frac{PLR(j) \times P_{designh}}{DC'(j)}$$

- calcolare il fattore correttivo nelle quattro condizioni

$$f_{COP}(j) = \frac{COP(j)}{COP'(j)}$$

- si interpola il fattore correttivo f_{COP} per fattori di carico diversi

Determinazione bin mensili

distribuzione normale

scarto quadratico medio

$$\begin{aligned}\sigma_{mese} &= 1,8^{\circ}\text{C} + H_{mese} \times 0,16^{\circ}\text{C} \times \text{m}^2/\text{MJ} + \Delta\sigma_{mese} \\ \Delta\sigma_{mese} &= \Delta\sigma_{max} \times k_{corr,\sigma,mese} \\ \Delta\sigma_{max} &= -0,502 - 0,15825 \times (\theta_{mese,01} - \theta_{progetto}) \\ &\quad + 0,06375 \times (\theta_{mese,01} - \theta_{progetto})^2 - H_{mese,01} \times 0,16^{\circ}\text{C} \times \text{m}^2/\text{MJ}\end{aligned}$$

dove

θ_{mese} temperatura esterna media mensile da UNI 10349

$\theta_{progetto}$ temperatura esterna di progetto invernale

H_{mese} irradiazione globale giornaliera media sul piano orizzontale
 $H_{mese} = H_{dh} + H_{bh}$

$H_{mese,01}, \theta_{mese,01}$ valori per il mese di gennaio

$k_{corr,\sigma,mese}$ gennaio 1; febbraio, dicembre 0,5; altri mesi 0,0

Bin mensili

distribuzione normale

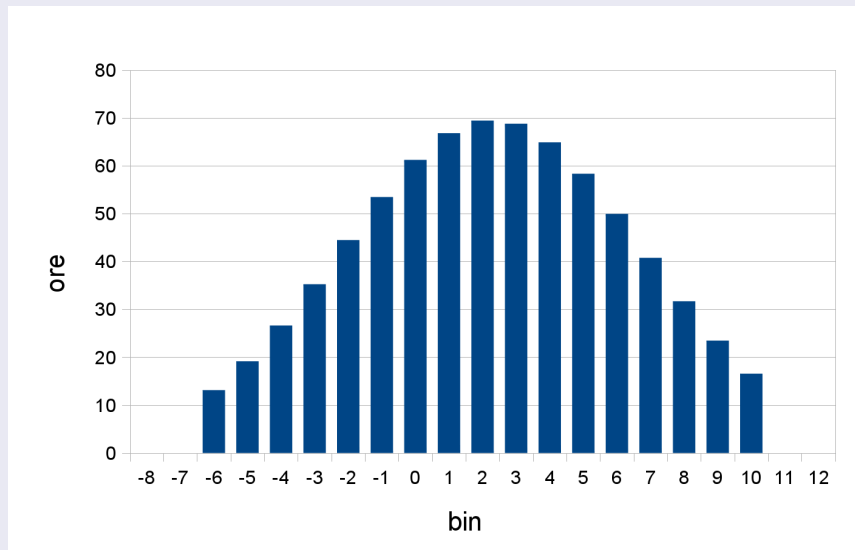
fattore di densità $K_{bin,mese}$ e durata bin

$$\begin{aligned}K_{bin,mese} &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta_{bin}-\theta_{mese}}{\sigma_{mese}}\right)^2} \times \Delta\theta_{bin} \\ t_{bin,mese,th} &= K_{bin,mese} \times t_{mese}\end{aligned}$$

- la serie va troncata azzerando i bin inferiori a 0,15 della durata del mese
- le ore troncate vanno ridistribuite sui restanti bin

$$t_{bin,mese} = t_{mese} \times \frac{t_{bin,mese,th}}{\sum t_{bin,mese,th}}$$

gennaio, Pordenone



Bilancio di un pannello

$$\boxed{\text{Energia al fluido}} = \boxed{\text{Radiazione}} - \boxed{\text{Perdite radiative}} - \boxed{\text{Perdite Conv + rad}}$$

Bilancio termico

$$\dot{m} \cdot c_l \cdot (\theta_{w,out} - \theta_{w,in}) = (\tau\alpha) \cdot G \cdot A - \varepsilon \cdot A \cdot (T_p^4 - T_a^4) - U \cdot A \cdot (\theta_p - \theta_a)$$

Bilancio e efficienza

$$\Phi_u = \Phi_{sol} - \Phi_l = A \cdot [(\tau\alpha) \cdot G - U_L \cdot (\theta_p - \theta_a)]$$
$$\eta = \frac{\Phi_u}{A \cdot G_i}$$

G_i radiazione incidente sul pannello

Φ_u flusso termico utile

η efficienza del pannello

resa del pannello

curve di efficienza

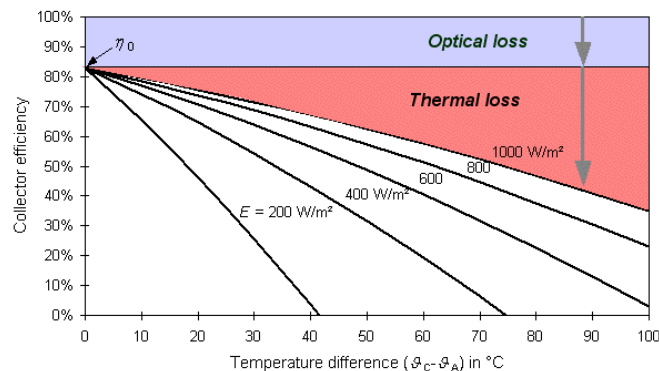
$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{\theta_m - \theta_a}{G} - a_2 \cdot G \left[\frac{\theta_m - \theta_a}{G} \right]^2$$

θ_m temperatura media nel pannello

θ_a temperatura dell'aria

η_0 efficienza a vuoto

a_1, a_2 coefficienti del pannello



IAM incidence angle modifier

- i dati sono forniti per incidenza normale η_0
- la radiazione solare non è normalmente normale alla superficie
- si introduce il parametro K_θ o IAM

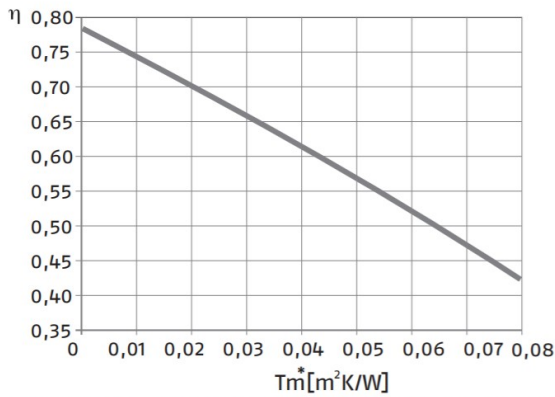
$$K_{\theta,b} = \frac{\eta_0(\theta)}{\eta_0(0^\circ)}$$
$$K_{\theta,d} = \int_0^{\pi/2} K(\theta) \cdot \sin(2\theta) \cdot d\theta$$

flusso utile

$$\Phi_u = A \cdot \left[\eta_0 (K_{\theta,b} G_{b,T} + K_{\theta,d} G_{d,T}) - a_1 \cdot (\theta_m - \theta_a) - a_2 \cdot (\theta_m - \theta_a)^2 \right]$$

Pannello Piano

CURVA DI EFFICIENZA



La curva di potenza nominale è riferita a 800 W/m^2 mentre la potenza di picco viene calcolata da normativa con un irraggiamento di 1000 W/m^2

| Descrizione | U/M | |
|--|---------------------------------|--------|
| Rendimento ottico all'assorbitore (η_0) (*) | % | 0,781 |
| Coefficiente di dispersione termica dell'assorbitore (a_1) (*) | $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ | 4,98 |
| Coefficiente di dispersione termica dell'assorbitore (a_2) (*) | $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ | 0,0005 |
| IAM (50°) (*) | - | 0,87 |
| Rendimento del collettore (η_{col}) (**) | % | 0,579 |

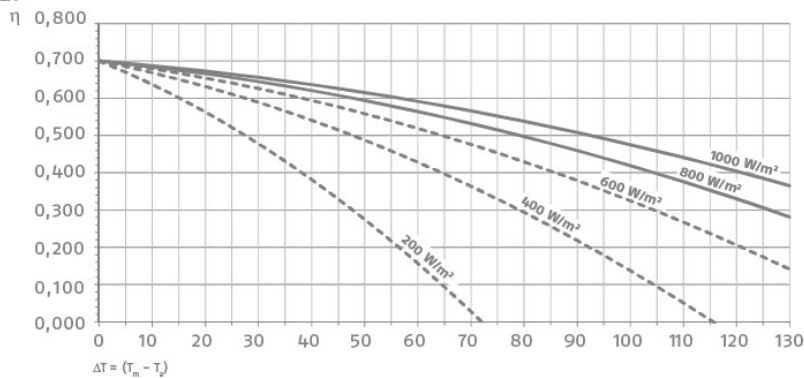
(*) Valore riferito all'area di apertura. Test secondo EN 12975 riferito a miscela acqua-glicole al 33,3%, portata di 160 l/h e irraggiamento $G = 800 \text{ W/m}^2$.
 $T_m = (T_{coll_ingresso} + T_{coll_uscita})/2$
 $T^*m = (T_m - T_{ambiente})/G$

(**) Calcolato ad una differenza di temperatura di 40K tra il collettore solare e l'aria ambiente circostante, con un irraggiamento solare globale, riferito all'area di apertura, di 1000 W/m^2 .

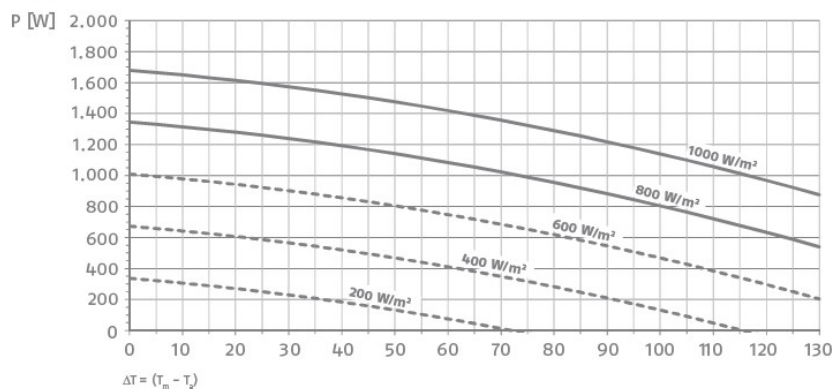
Pannello a Tubi

CSV 25 R

CURVA DI EFFICIENZA



CURVA DI POTENZA RESA



- La specifica tecnica UNI/TS 11300-4 propone un metodo di calcolo dei pannelli solari basato sul metodo F-Chart
- si applica a pannelli per produzione ACS, riscaldamento o combinati

metodo di calcolo

- 1 Calcolo fabbisogno applicato all'impianto e calcolo rapporti P_H e P_W
- 2 Calcolo dei fattori adimensionali X e Y ;
- 3 Calcolo dell'energia solare prodotta mensilmente
- 4 Calcolo fabbisogno ausiliari
- 5 Calcolo perdite termiche
- 6 Calcolo delle perdite recuperabili

Riscaldamento e ACS

Calcolo frazioni riscaldamento e ACS

$$P_H = \frac{Q_{H,gn,out}}{Q_{H,gn,out} + Q_{W,gn,out}}$$
$$P_W = \frac{Q_{W,gn,out}}{Q_{H,gn,out} + Q_{W,gn,out}}$$

Le frazioni P_H e P_W vengono utilizzate per

- ripartire la superficie dei collettori
- ripartire il volume dell'accumulo se unico per i due servizi

$$Q_{sol,out,mese} = (aY + bX + cY^2 + dX^2 + eY^3 + fX^3) \times Q_{gn,out,mese} \quad [\text{kWh}]$$

$Q_{gn,out,mese}$ fabbisogno mensile applicato all'impianto

X, Y fattori adimensionali

| Coefficienti di correlazione | Tipo di sistema | |
|------------------------------|-------------------------------|--|
| | Sistema collegato ad accumulo | Sistema diretto (riscaldamento a pannelli) |
| a | 1,029 | 0,863 |
| b | -0,065 | -0,147 |
| c | -0,245 | -0,263 |
| d | 0,0018 | 0,008 |
| e | 0,0215 | 0,029 |
| f | 0 | 0,025 |

Fattore adimensionale X

Riscaldamento

$$X_H = \frac{A \times p_H \times \eta_{loop} \times \Delta T \times f_{st} \times t_m}{Q_{H,gn,out,mese} \times 10^3}$$

ACS

$$X_W = \frac{A \times p_W \times \eta_{loop} \times \Delta T \times f_{st} \times t_m}{Q_{W,gn,out,mese} \times 10^3}$$

A area di captazione

U_{loop} coefficiente di perdita del circuito collettore solare

η_{loop} rendimento del circuito se non sono forniti dati $\eta_{loop}=0,8$

ΔT differenza temperatura di riferimento

f_{st} correzione per accumulo

t_m periodo di calcolo

Riscaldamento e ACS

$$Y_H = \frac{A \times IAM \times \eta_0 \times \eta_{loop} \times I_m \times t_m}{Q_{gn,out,mese} \times 10^3}$$

A area di captazione

IAM modificatore dell'angolo di incidenza

η_{loop} rendimento del circuito se non sono forniti dati $\eta_{loop}=0,8$

η_0 rendimento del collettore a perdite nulle

I_m irradianza solare sul piano sel collettore [E/m^2]

t_m periodo di calcolo

$Q_{gn,out,mese}$ fabbisogno applicato all'impianto, per sistemi combinati deve essere distinto per le relative quote

fabbisogno di energia elettrica ausiliari

sistemi a circolazione forzata

$$Q_{sol,aux,m} = W_{aux,nom} \times t_{aux,m} / 1000 \text{ kWh}$$

$W_{aux,nom}$ potenza nominale circolatori $W_{aux,nom} = 50 + 5 \times A$ [W] se non fornita

$t_{aux,m}$ numero di ore di funzionamento

$$t_{aux,W,m} = \frac{2000 \times I_{sol} \times P_W}{\sum I_{sol}}$$

$$t_{aux,H,m} = \frac{2000 \times I_{sol} \times N_{g,H,mese} \times P_H}{\sum I_{sol} \times N_{g,H,mese}}$$

Perdite

- le perdite si calcolano su base mensile, considero
- accumulo ACS
- accumulo riscaldamento
- perdite di distribuzione tra sottoistema solare termico e ausiliario di integrazione

Recuperi

- perdite recuperabili da accumulo in ambiente
- perdite recuperabili dal circuito di collegamento tra serbatoio e riscaldatore ausiliario
- energia recuperabile da ausiliari elettrici su circuito di distribuzione

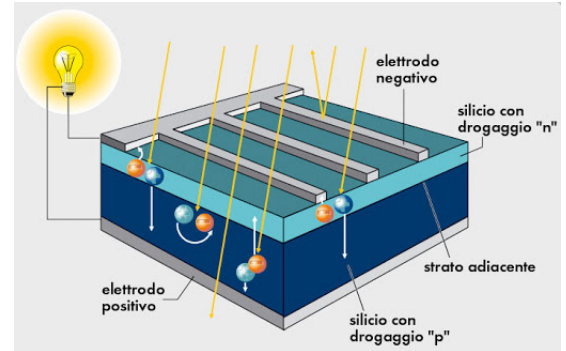
Caratteristiche dei collettori solari

| Tipologia del collettore | η_0 | a_1 [W/(m ² K)] | a_2 [W/(m ² K)] | IAM |
|--|----------|---------------------------------|---------------------------------|------|
| Collettori a tubi sottovuoto con assorbitore piano | 0,90 | 1,8 | 0,008 | 0,97 |
| Collettori a tubi sottovuoto con assorbitore circolare | 0,90 | 1,8 | 0,008 | 1,00 |
| Collettori piani vetrati | 0,78 | 3,5 | 0,015 | 0,94 |
| Collettori non vetrati | 0,76 | 15 | 0 | 1,00 |

Fotovoltaico

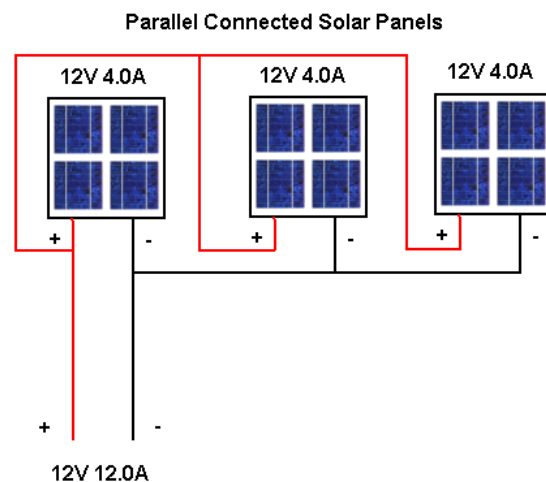
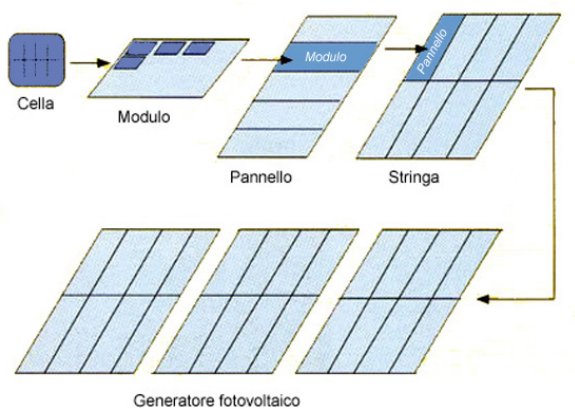
Effetto fotovoltaico

- la radiazione elettromagnetica cede energia agli elettroni esterni
- con energia sufficiente l'elettrone è libero
- l'assenza di elettrone nell'atomo è chiamata lacuna
- si utilizzano semiconduttori drogati con atomi di altri elementi
- struttura *p* eccesso di lacune
- strutture *n* eccesso di elettroni



Fotovoltaico

componenti e connessioni



Tipologie di pannelli

monocristallino

- Alta efficienza (18-22%)
- Minor superficie richiesta a parità di potenza
- Migliore resa energetica con luce diretta
- Colorazione omogenea
- costo

policristallino

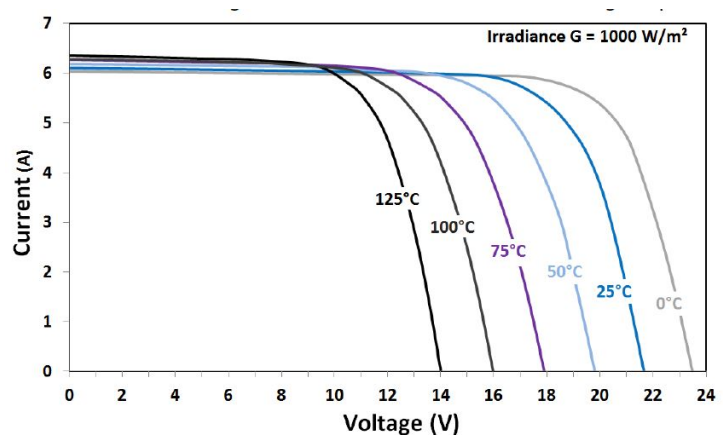
- media efficienza (14-16 %)
- maggior superficie richiesta
- Resa energetica con luce diffusa
- Colorazione a macchie
- Prezzo minore

amorfo

- bassa efficienza (6-8 %)
- elevate superfici occupate
- Resa energetica con luce diffusa
- Colorazione omogenea
- forme possibili
- basso costo

Effetto della temperatura

- rapporto tra tensione e corrente
- la potenza resa dipende dalla tensione
- la potenza dipende dalla temperatura
- la potenza diminuisce all'aumentare della temperatura
- i pannelli devono essere ventilati



Energia prodotta mensilmente

$$E_{el,pv,out} = \frac{E_{pv} \times W_{pv} \times f_{pv}}{I_{ref}}$$

E_{pv} irradianza solare mensile incidente

W_{pv} potenza di picco

f_{pv} fattore di efficienza del sistema

I_{ref} irradianza solare di riferimento 1 kWh/m²

| 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 |