

Corso di formazione ed aggiornamento professionale
per Energy Manager

Giornata seminariale

Solare termico

Dr. Vincenzo Sabatelli

(e-mail: vincenzo.sabatelli@enea.it)

Sommario:

- Cenni sulle tecnologie solari**

- Dimensionamento ed ottimizzazione tecnico-economica**
 - Criteri generali di dimensionamento
 - Metodi di calcolo della frazione solare (metodo CSTG per sistemi a circolazione naturale, metodo *f-Chart* per sistemi a circolazione forzata)
 - Analisi economica (metodo del costo globale attualizzato - CGA)

- Normativa tecnica**

- Mercato e condizioni di sviluppo**

Parte I

Sistemi solari termici

Le tecnologie

Sfruttamento termico dell'energia solare

Le tecnologie per utilizzare l'energia solare al fine di produrre calore sono di tre tipi:

➤ **Bassa temperatura**

Le tecnologie a bassa temperatura comprendono i sistemi che usano un collettore solare per riscaldare un fluido. Lo scopo è captare e trasferire energia solare per produrre acqua calda o riscaldare gli edifici.

➤ **Media temperatura**

Le tecnologie a media temperatura richiedono dispositivi a debole concentrazione per raggiungere temperature fino ai 250°C. Le principali applicazioni sono legate a processi industriali e alla produzione di acqua dissalata.

➤ **Alta temperatura**

Anche le tecnologie ad alta temperatura richiedono dispositivi per concentrare la radiazione solare che consentono di raggiungere temperature superiori anche ai 400°C. Le principali applicazioni sono legate alla produzione di energia elettrica per via termodinamica.

Solare termico a bassa temperatura

Le principali applicazioni sono raggruppabili come segue:

Sistemi per ACS

- Sono i sistemi più largamente diffusi in Italia ed in generale in Sud Europa
- Sono progettati normalmente per coprire il 60-80% del fabbisogno annuo di ACS
- Hanno costi competitivi soprattutto se sostituiscono boiler elettrici

Combi-System

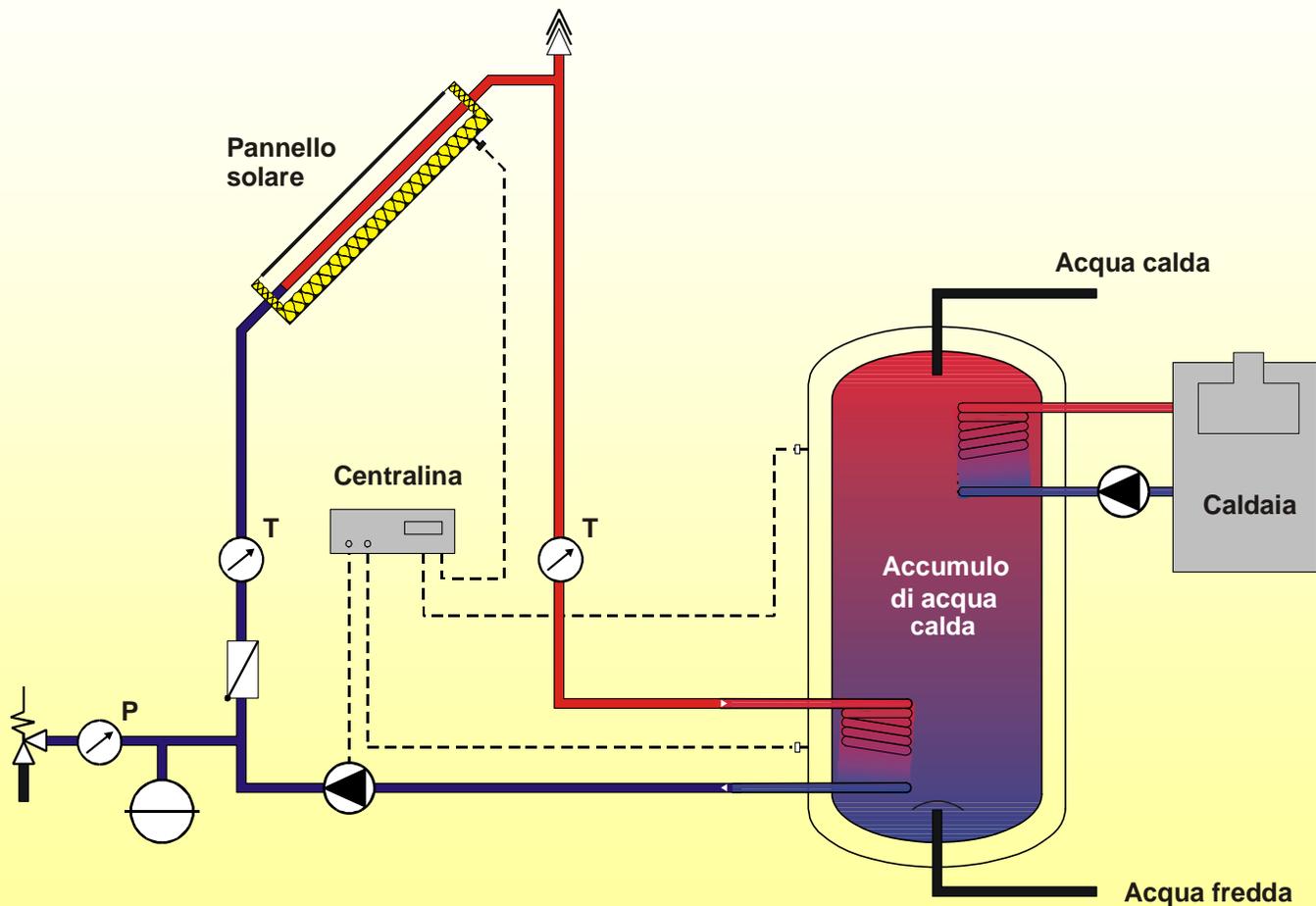
- Sono meno comuni in Italia; largamente diffusi in Centro e Nord Europa
- Sono progettati normalmente per coprire circa il 50% del fabbisogno termico annuo
- Poco competitivi in Sud Europa per il ridotto periodo di riscaldamento

Componenti di un impianto solare

Un impianto per l'utilizzo termico a bassa temperatura dell'energia solare comprende i seguenti elementi:

- **Un sistema di captazione e trasformazione dell'energia:** corrisponde al pannello o collettore solare, che assorbe la radiazione solare e la trasforma direttamente in energia termica, trasferendolo ad un opportuno fluido termovettore.
- **Un sistema di accumulo:** è costituito da un serbatoio contenente il fluido da utilizzare, con le funzioni principali di ridurre la variabilità dell'energia incidente e rimediare allo sfasamento temporale tra disponibilità e fabbisogno.
- **Un circuito idraulico:** collega i collettori e l'accumulo con opportuno sistema di regolazione e di circolazione del fluido ed, essendo quasi sempre diverso il fluido termovettore da quello utilizzato dall'utente, deve essere previsto uno scambiatore di calore.
- **Un sistema di integrazione:** consente di sopperire ai periodi di minore insolazione.

Schema di un impianto per usi domestici



Le famiglie di impianti solari

Gli impianti solari possono essere classificati in:

❑ **Impianti "Factory Made"**

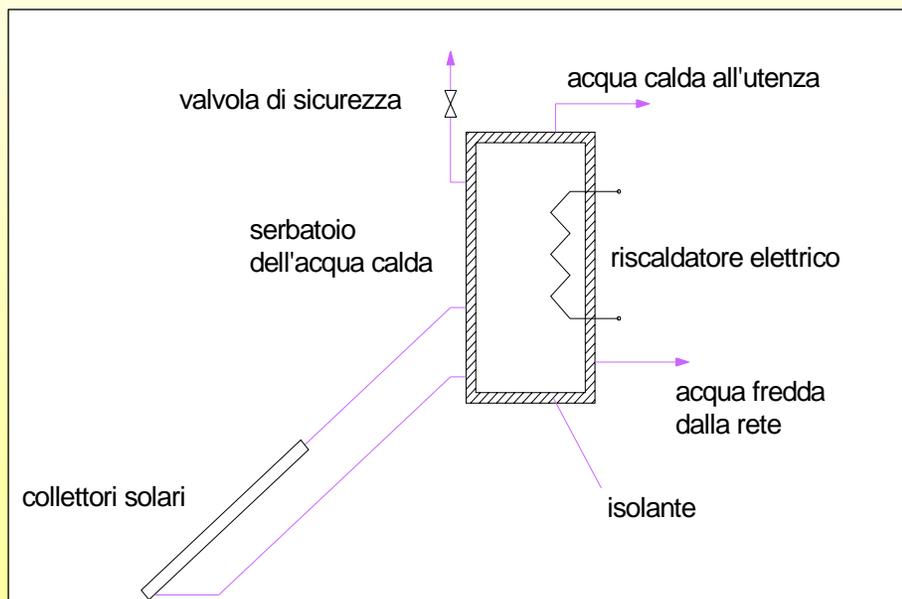
- Preassemblati in fabbrica
- A circolazione naturale
- Utenze monofamiliari
- Superficie collettori generalmente minore di 4 m².

❑ **Impianti "Custom Built"**

- Assemblati con componenti scelti tra una grande varietà
- A circolazione forzata
- Utenze multifamiliari
- Superficie collettori generalmente superiore ai 10 m².

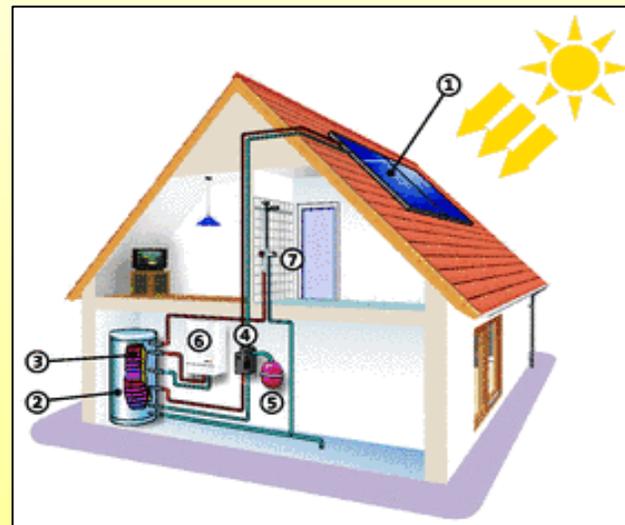
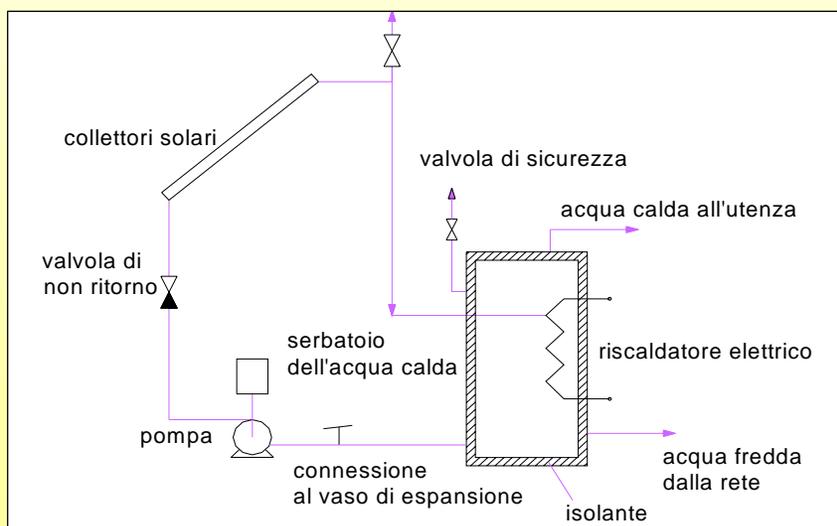
Sistemi a circolazione naturale

- La circolazione del fluido termovettore avviene sfruttando la legge fisica secondo la quale il riscaldamento dell'acqua ne fa diminuire la densità ed origina un flusso convettivo naturale verso l'alto; tale fenomeno è favorito disponendo il serbatoio al di sopra del collettore.
- Di solito sono di dimensioni contenute e si trovano in commercio come sistemi "factory made".



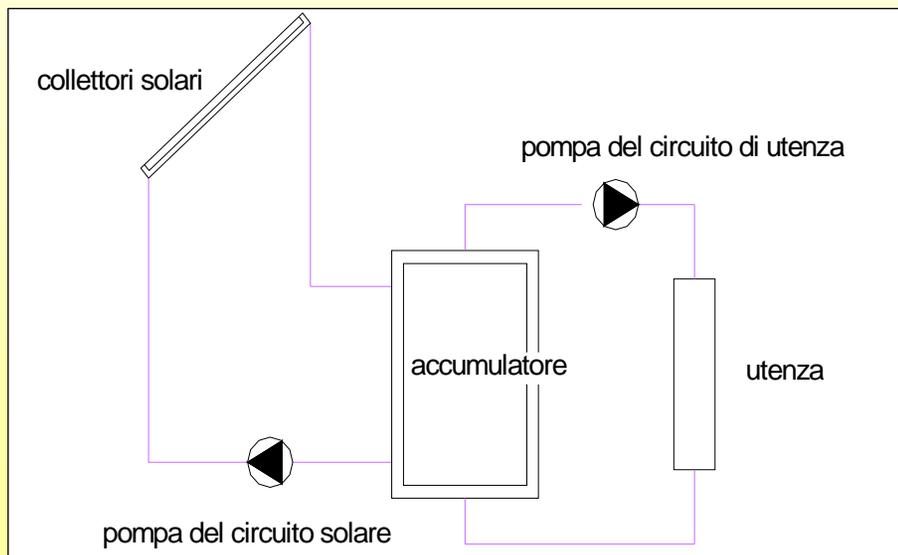
Sistemi a circolazione forzata

- La circolazione del fluido termovettore avviene tramite una pompa attivata da un termostato differenziale quando il ΔT tra il fluido all'uscita dai collettori e l'acqua nel serbatoio è di $5 \div 10$ °C.
- Vengono impiegati quando non è possibile disporre il serbatoio più in alto dei collettori o la circolazione naturale del fluido termovettore è resa impossibile dall'eccessiva lunghezza dei tubi di collegamento.
- Di solito sono per utenze multifamiliari e si trovano in commercio come sistemi "Custom Built".



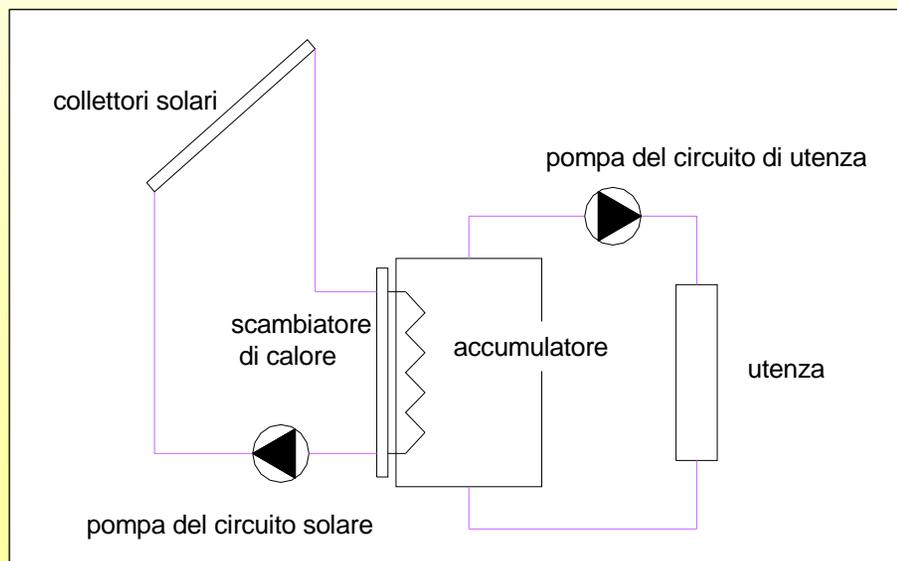
Sistemi a circuito aperto

- Il fluido termovettore che scorre nei collettori è proprio l'acqua destinata all'utenza.
- L'assenza dello scambiatore di calore, determina un'efficienza maggiore, in quanto il fluido circolante nei pannelli può essere utilizzato alla massima temperatura disponibile, ed un costo minore.
- Vengono utilizzati per lo più in Israele e in Grecia, non in Italia dove le condizioni climatiche richiedono comunque l'utilizzo di una miscela antigelo per far fronte alle basse temperature notturne.



Sistemi a circuito chiuso

- Il fluido termovettore in uscita dai collettori (liquido antigelo) è diverso dall'acqua destinata all'utenza.
- Per il trasferimento dell'energia termica si impiega uno scambiatore di calore posizionato all'interno o all'esterno del serbatoio. L'utilizzo di uno scambiatore esterno migliora la prestazione annuale dell'impianto, ma comporta anche un aumento dei costi e dell'ingombro.
- Sono i sistemi utilizzati in Italia.



Tipologie di collettori solari

I pannelli solari si dividono in due grandi famiglie:

- **Collettori scoperti:** in cui l'acqua passa all'interno dei tubi del pannello, viene riscaldata direttamente dai raggi solari ed inviata ad un serbatoio di accumulo o, in uno schema ancora più semplificato, immediatamente all'utenza.
- **Collettori coperti:** denominati comunemente vetrati in cui, per ottenere prestazioni più spinte, si sfrutta l'effetto serra proteggendo i tubi dove scorre il fluido termovettore con una o più coperture trasparenti in vetro o plastica.

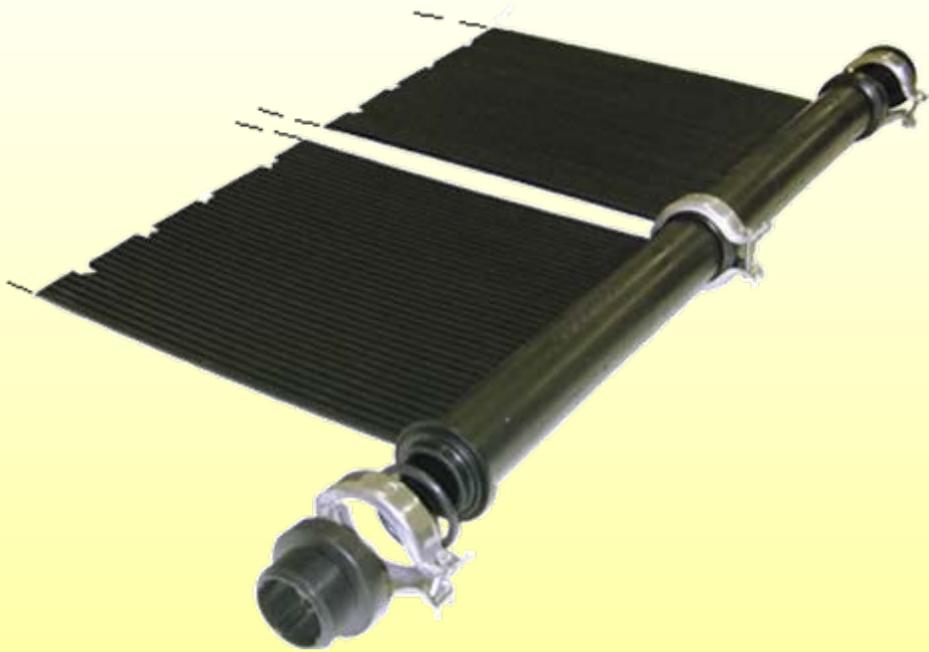
Collettori scoperti

Rappresenta la tipologia di collettori solari più semplice

- **Costi contenuti**
- **Facilità di installazione**
- **L'assenza di coibentazione ne limita l'utilizzo alla sola stagione estiva**
- **Temperature di funzionamento $< 50\text{ }^{\circ}\text{C}$**
- **Impiego ideale per utenze estive (piscine scoperte, stabilimenti balneari, camping, hotel)**



Collettori scoperti



Collettori vetrati piani

Rappresenta la tipologia più comune

ASSORBITORE

Provvede ad assorbire la radiazione ed a trasferire l'energia raccolta ad un fluido termo-vettore

COPERTURA TRASPARENTE

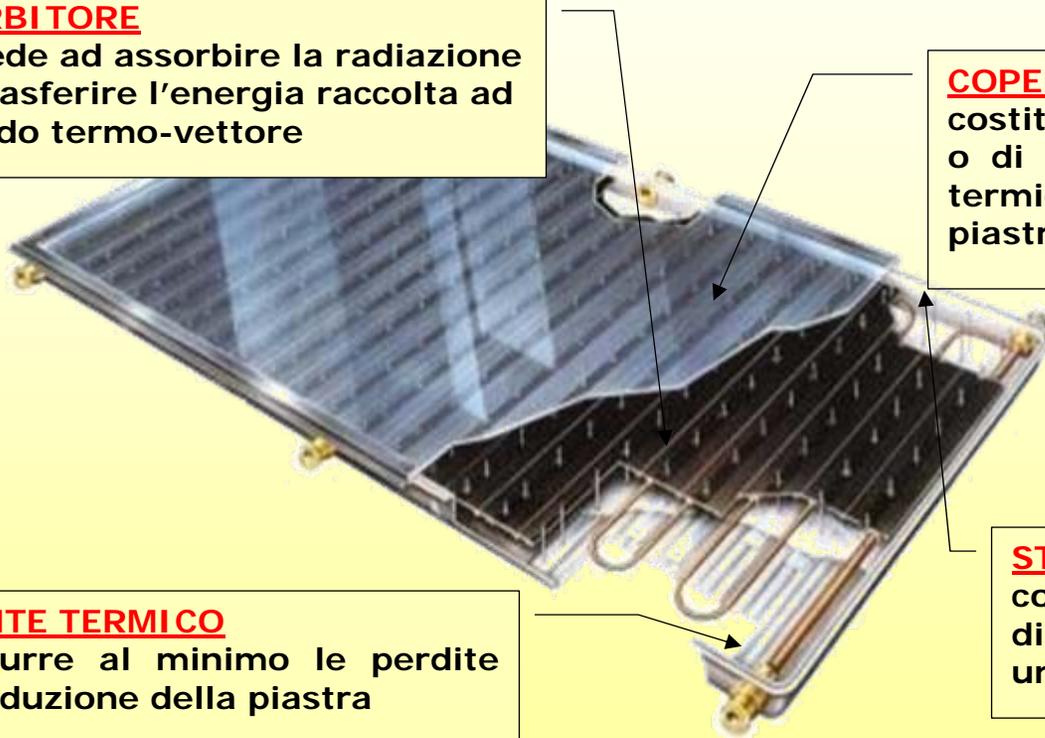
costituita da una o più lastre di vetro o di plastica per ridurre gli scambi termici convettivi e radiativi tra la piastra e l'atmosfera

ISOLANTE TERMICO

per ridurre al minimo le perdite per conduzione della piastra

STRUTTURA ESTERNA

con funzione di contenimento e di protezione da polvere, umidità, ed agenti atmosferici

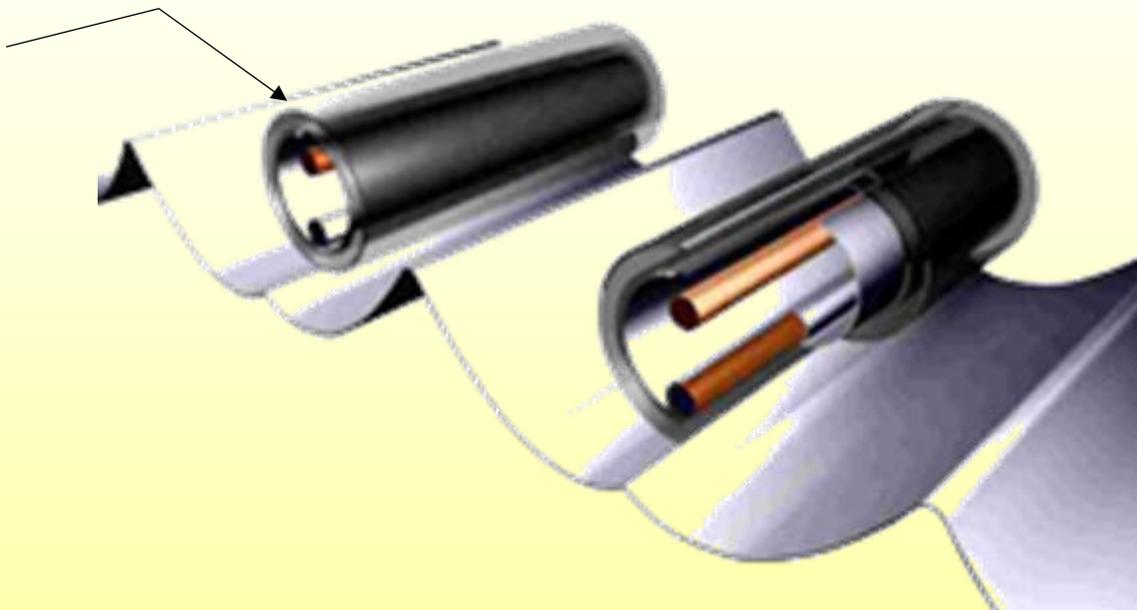


Collettori a tubi evacuati

Rappresenta la tipologia dalle caratteristiche tecnologiche più avanzate

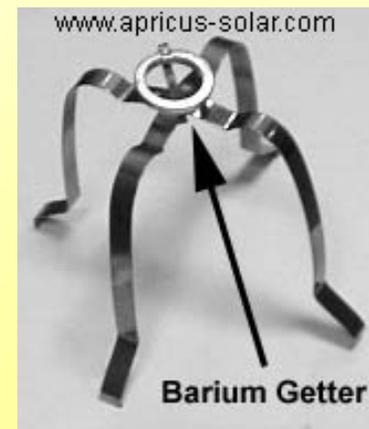
In questo tipo di collettore l'assorbitore è costituito da una pellicola depositata sulla superficie interna di un tubo di vetro.

Il fluido termo-vettore scorre in un tubo ad U o in un sistema di tubi concentrici.



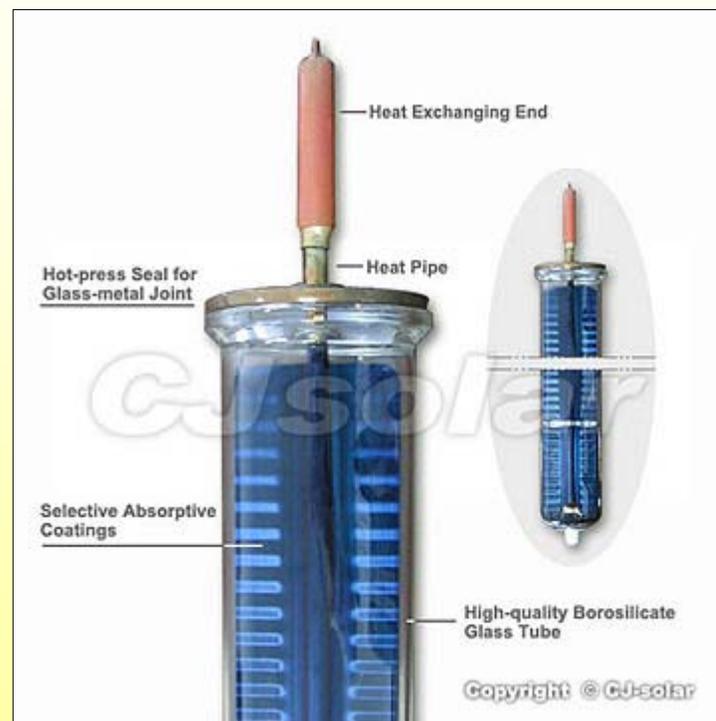
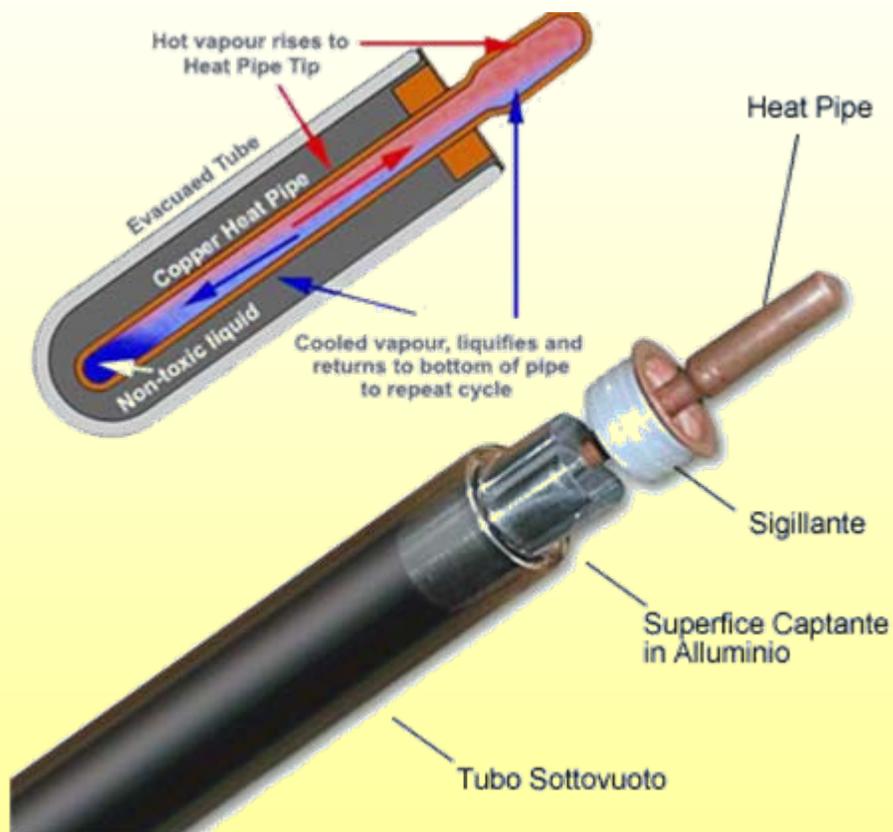
Per incrementare le performance nell'intercapedine tra i due tubi di vetro è praticato il vuoto (**collettore a tubi evacuati**).

Collettori a tubi evacuati



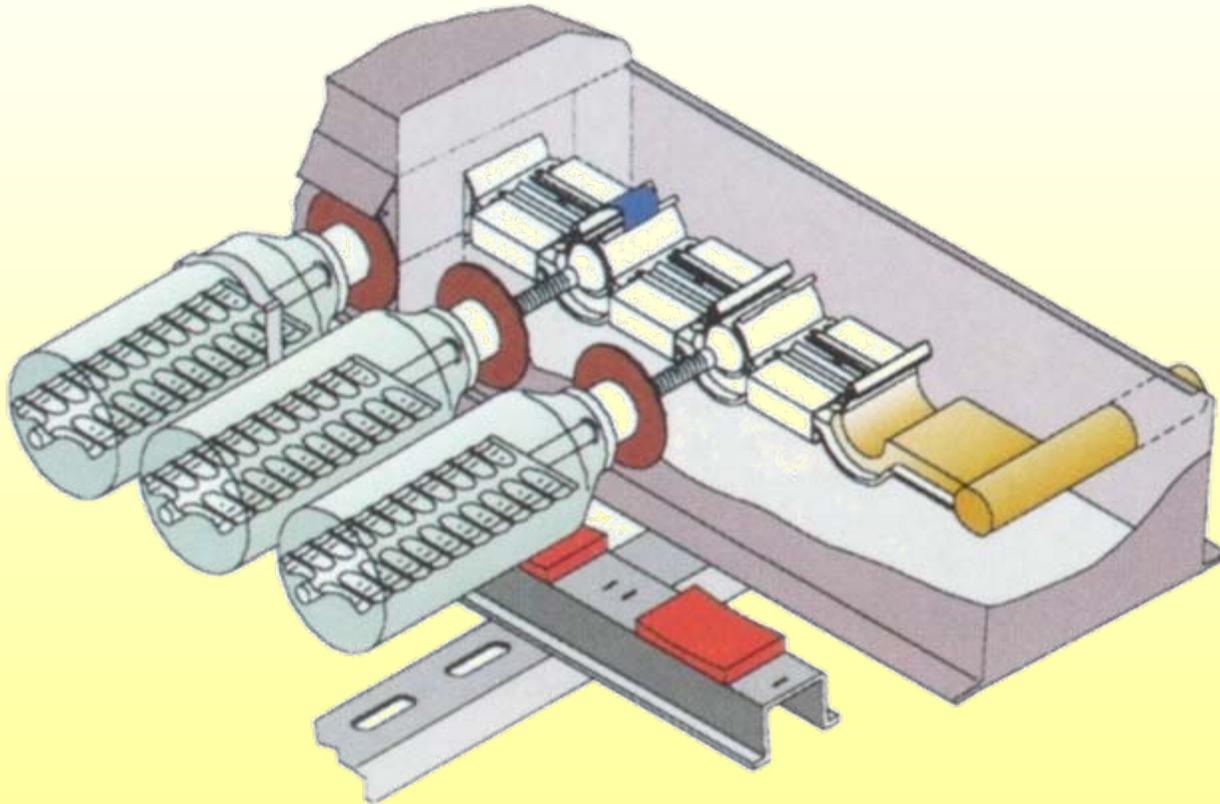
Collettori a tubi evacuati

Tecnologia Heat-pipe monotubo



Collettori a tubi evacuati

Tecnologia Heat-pipe monotubo

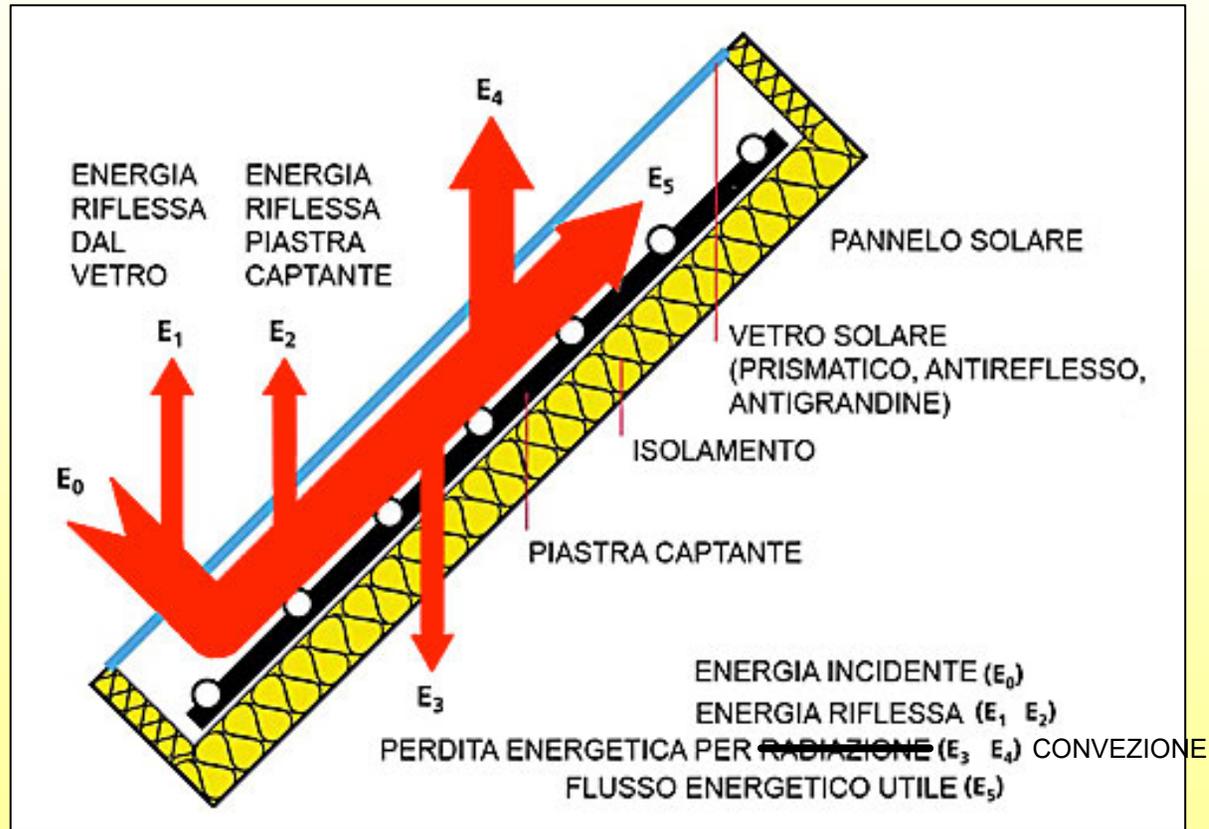


Sistemi a tubi evacuati (a innesto diretto)



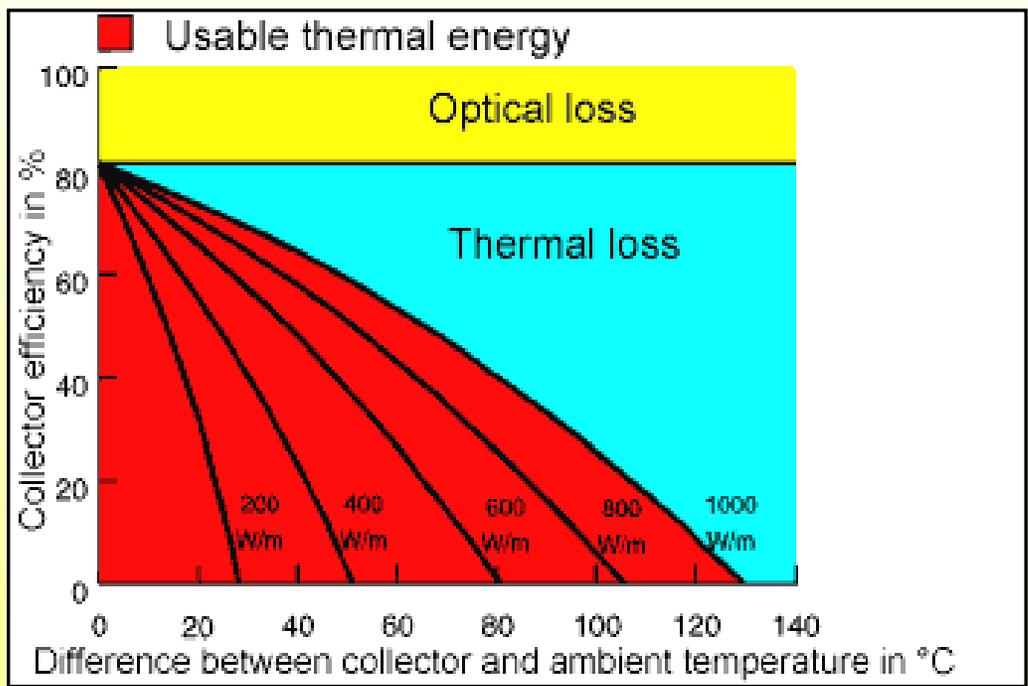
Prestazioni energetiche

DIAGRAMMA SCHEMATICO DEI FLUSSI ENERGETICI



Bilancio energetico in un collettore vetrato

$$\boxed{\text{Energia trasferita al fluido}} = \boxed{\text{Radiazione solare}} - \boxed{\text{Perdite ottiche}} - \boxed{\text{Perdite termiche}}$$



- Proporzionali a $(1 - \tau\alpha)$
- Limitata possibilità di riduzione
- Ammontano a ~20-25% delle perdite totali

- Proporzionali a ΔT
- Aumentano sensibilmente con le alte temperature

Modello energetico del collettore

$$\Gamma c_p (T_{out} - T_{in}) = (\tau\alpha)GA - \varepsilon\sigma A(T_p^4 - T_a^4) - UA(T_p - T_a)$$

Energia trasferita
al fluido

Energia assorbita
dalla piastra

Energia persa per
irraggiamento

Perdite convettive
e conduttive

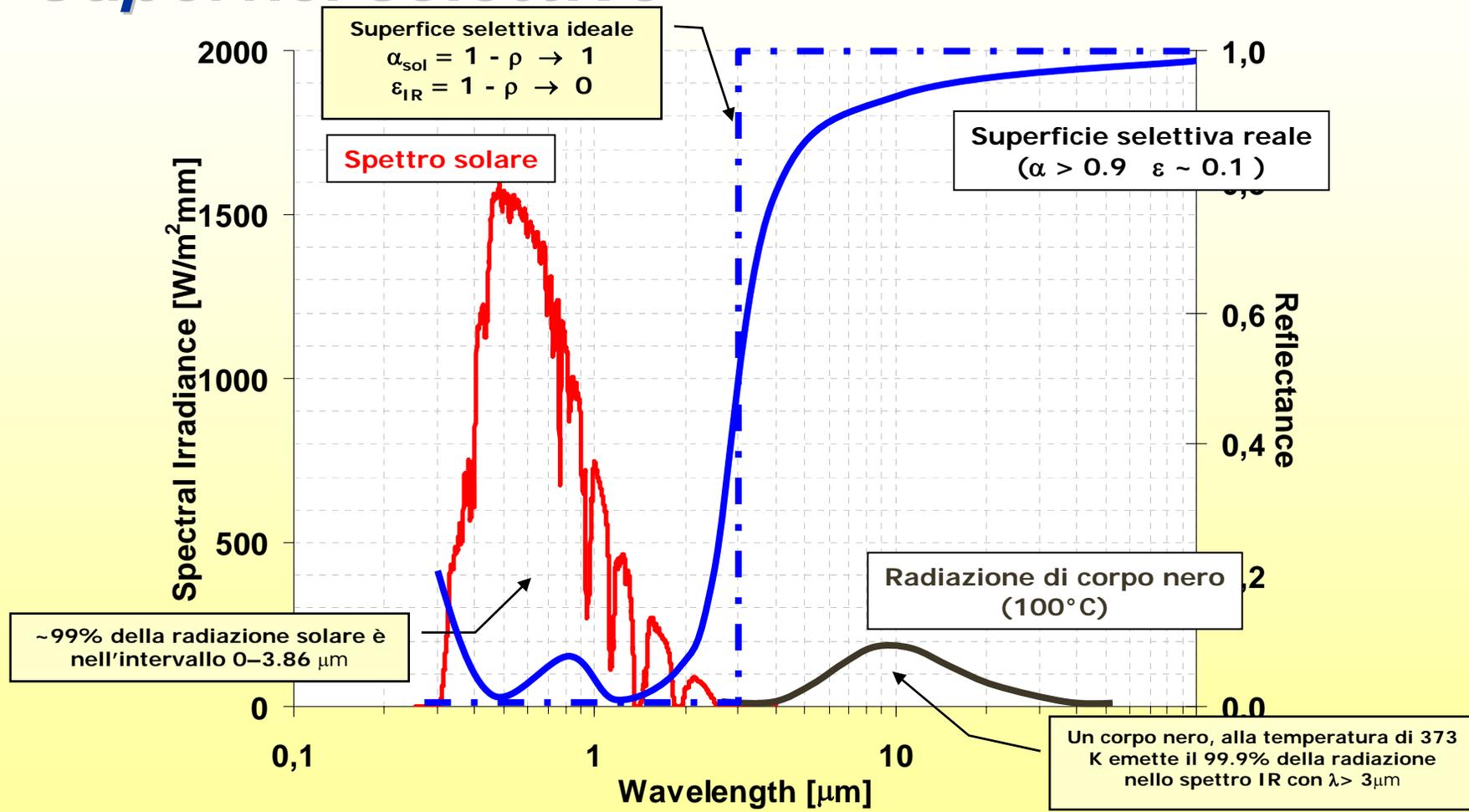
Bilancio energetico in stato stazionario:

$$\begin{aligned} Q_{utile} &= Q_{solare} - Q_{persa} \\ &= A [(\tau\alpha)G - U_L(T_p - T_a)] \end{aligned}$$



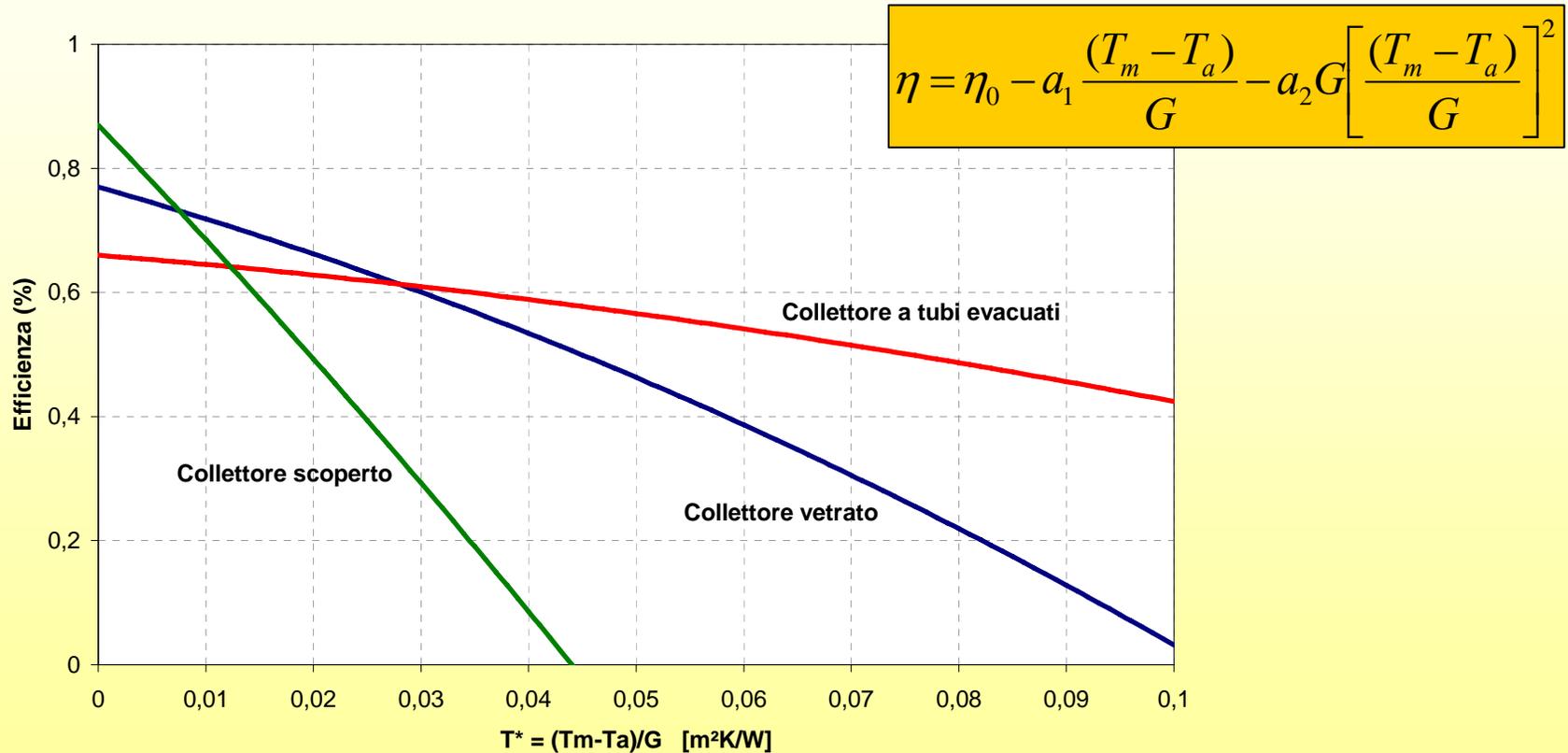
$$\eta = \frac{Q_u}{AG_{tilt}}$$

Superfici selettive



Curve di efficienza

Le prestazioni di un collettore solare vengono descritte da una curva che ne rappresenta l'efficienza al variare della temperatura di funzionamento.



Parte II

Sistemi solari termici

Dimensionamento ed ottimizzazione tecnico-economica

Il problema del dimensionamento

Il criterio delle condizioni più gravose porterebbe ad un sovradimensionamento intollerabile del campo che, per il costo dei collettori, lo renderebbe fallimentare e comunque non assicurerebbe la piena autonomia.

Il problema del corretto dimensionamento è dunque non solo una questione tecnica ma tecnico-economica.

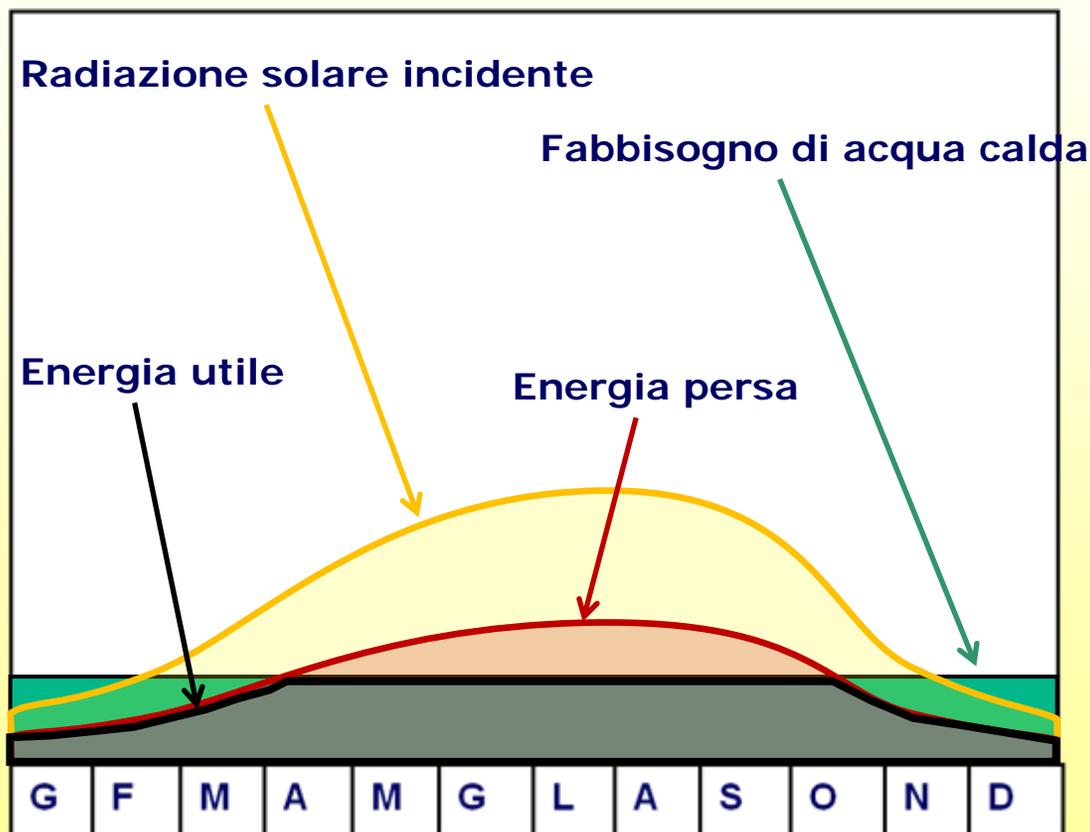
Una progettazione razionale richiede un'accurata previsione dell'energia utile che l'impianto potrà fornire (frazione del carico termico)



Utilizzo di software specifici per il dimensionamento tecnico/economico

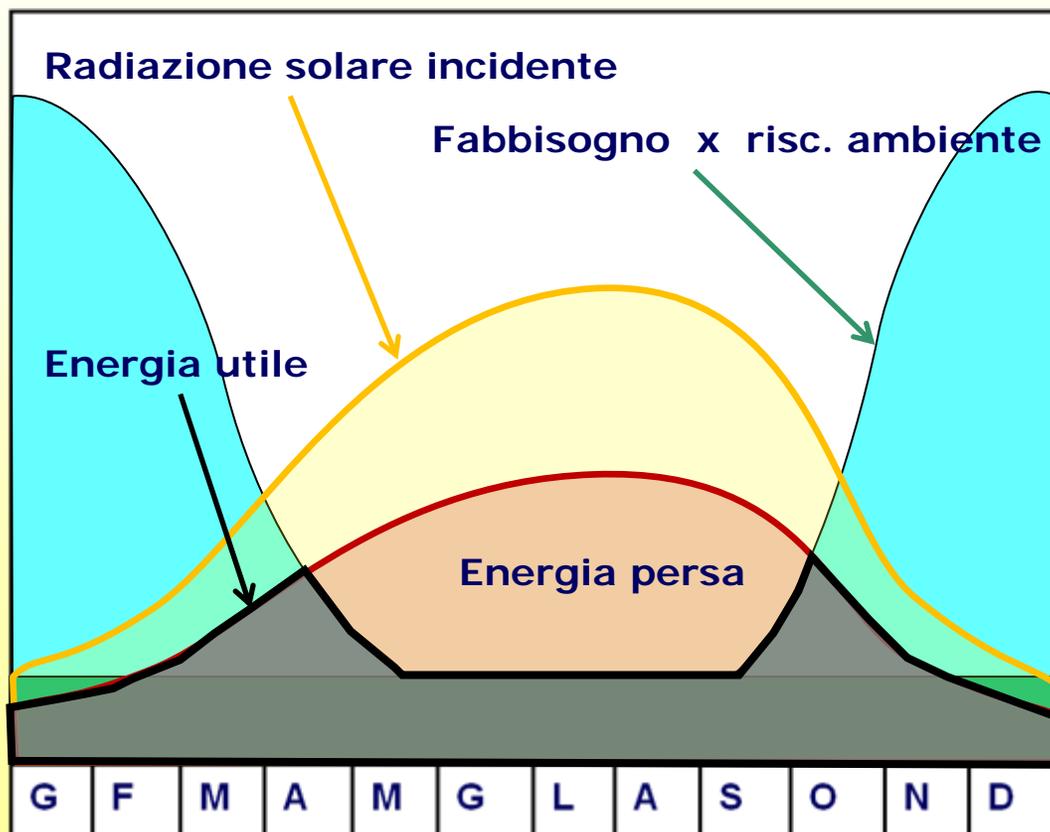
Criteri generali di dimensionamento

Produzione di acqua calda sanitaria



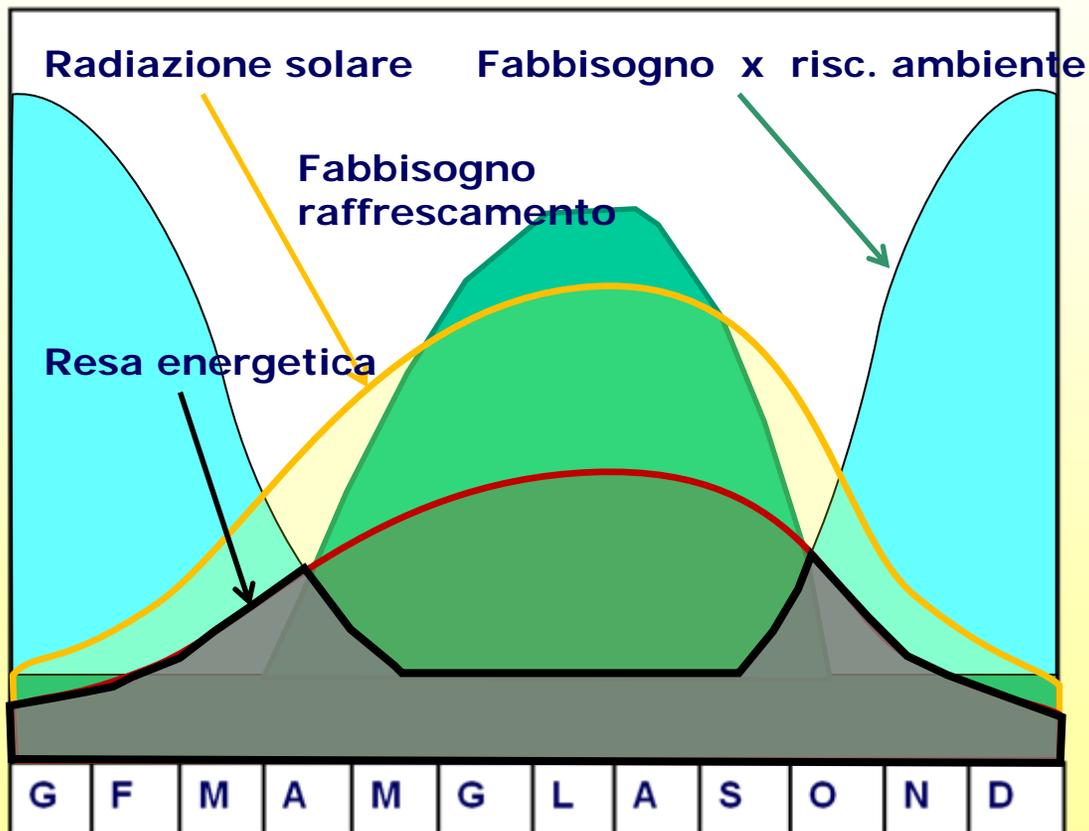
Criteri generali di dimensionamento

Sistema combinato (Combi-System)



Criteri generali di dimensionamento

Climatizzazione estiva degli ambienti (Solar cooling)

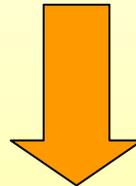


Criteri generali di dimensionamento

Per impianti "Factory Made" è possibile adottare dei criteri semplificati:

**Superficie: 0.7 – 1.2 m² a persona
(in funzione della localizzazione geografica)**

Volume accumulo: 50-70 litri/m²



~ 600-750 kWh_t/m² anno

Dimensionamento di un impianto solare

- Calcolo della radiazione disponibile**
- Stima del carico termico**
- Dimensionamento del campo solare**
- Dimensionamento del serbatoio**
- Calcolo della frazione solare su base mensile ed annuale**

- Dimensionamento dei componenti del circuito solare (scambiatore di calore, vaso di espansione, ecc.)**

Radiazione disponibile: esempio di calcolo

Insolazione giornaliera media mensile per BOLOGNA

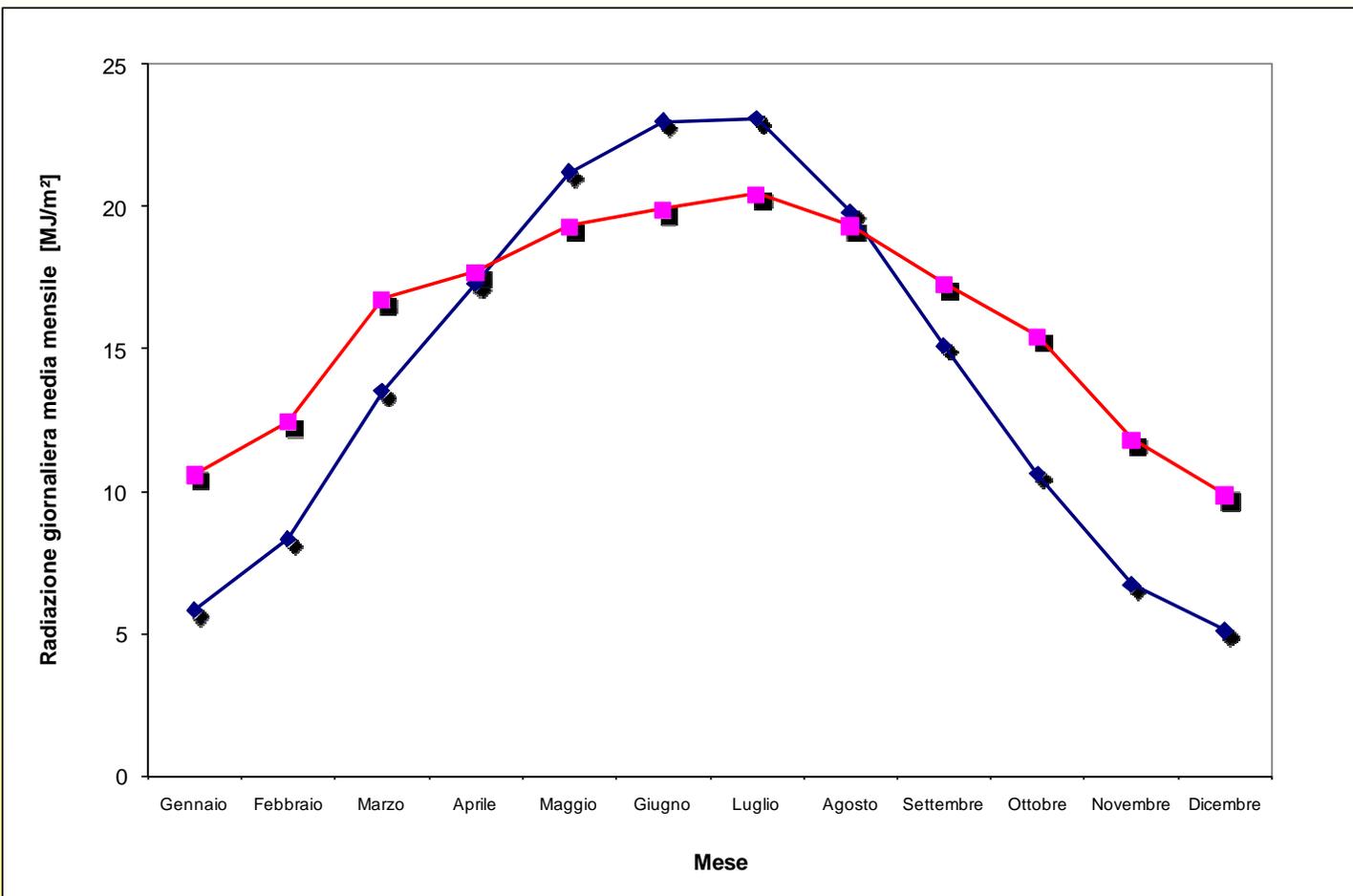
	Orizzontale MJ/m ² giorno	Inclinazione 45° MJ/m ² giorno
Gennaio	5,40	10,18
Febbraio	8,20	12,75
Marzo	13,70	17,48
Aprile	17,30	17,95
Maggio	21,10	19,45
Giugno	23,10	20,21
Luglio	23,30	20,87
Agosto	19,70	19,47
Settembre	15,10	17,61
Ottobre	10,10	15,01
Novembre	6,20	11,21
Dicembre	4,50	8,82

Valore annuo:

Sull'orizzontale
H = 1420 kWh/m²

Sul piano inclinato a 45°
H = 1616 kWh/m²

Radiazione disponibile: esempio di calcolo



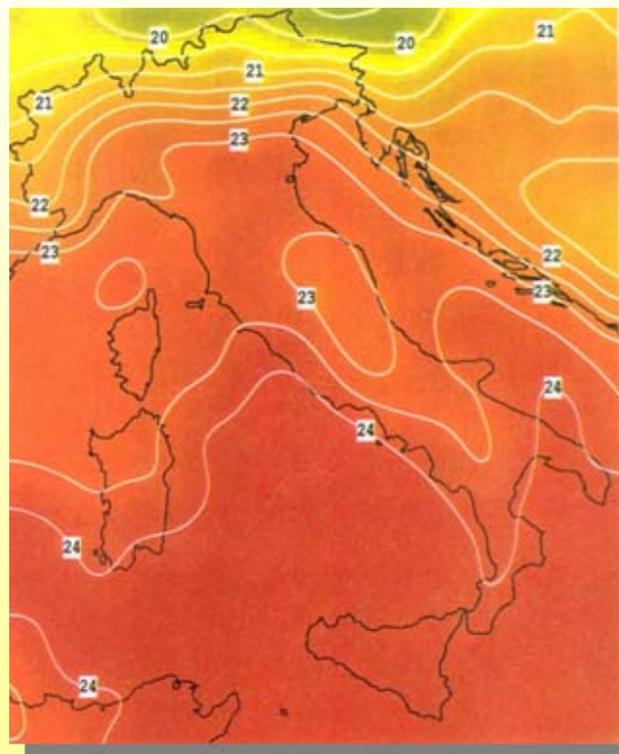
Distribuzione della radiazione in Italia

Radiazione giornaliera media mensile (MJ/m²)

Mese di Febbraio



Mese di Luglio



Radiazione disponibile

Dove reperire le informazioni circa la radiazione disponibile:

- **Pubblicazione ENEA** - "La radiazione solare globale al suolo in Italia"
- Standard **UNI 8477** – "Energia solare – Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia – Valutazione dell'energia raggiante ricevuta"
- Standard **UNI 10349** – "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici"

- **ENEA-Atlante della radiazione solare**
(<http://www.solaritaly.enea.it>)

- **NASA-Surface meteorology and Solar Energy Data Set**
(<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>)

Inclinazione ed orientazione

L'inclinazione e l'orientazione dei pannelli devono essere appropriati alle esigenze dell'utenza.

Infatti, a seconda:

- del periodo previsto di funzionamento dell'impianto solare (stagione estiva o durante tutto l'anno)
- del sito in cui installare l'impianto

Per massimizzare la quantità di energia media captata durante tutto il periodo di funzionamento, sia l'**inclinazione** che l'**orientazione** da dare ai pannelli possono cambiare.

Inclinazione ed orientazione

ORIENTAZIONE OTTIMALE:

per massimizzare l'energia raccolta, i collettori devono essere orientati a Sud (è tuttavia possibile discostarsi di $\pm 15^\circ$ con una diminuzione trascurabile sul totale dell'energia raccolta)

INCLINAZIONE OTTIMALE:

- per utenze estive, l'inclinazione ottimale del collettore è di circa **15° inferiore alla latitudine del sito**
- per utenze annuali, l'inclinazione ottimale è **pari alla latitudine del sito.**

Dimensionamento del serbatoio

Il serbatoio serve a equilibrare lo sfasamento temporale tra la presenza di radiazione solare e la richiesta di a.c.s.

Serbatoi dall'ampio volume permettono di superare periodi anche lunghi di assenza di insolazione, tuttavia causano anche maggiori dispersioni di calore.

Per applicazioni domestiche, il volume tipico del serbatoio corrisponderà a circa **50 - 70 litri/m²** di superficie captante.

Componenti d'impianto

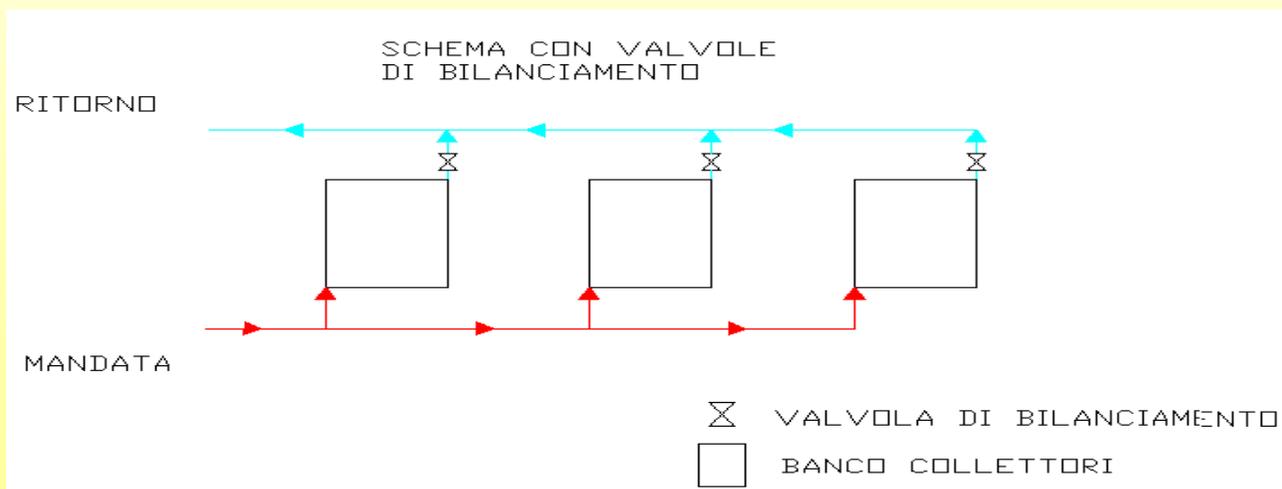
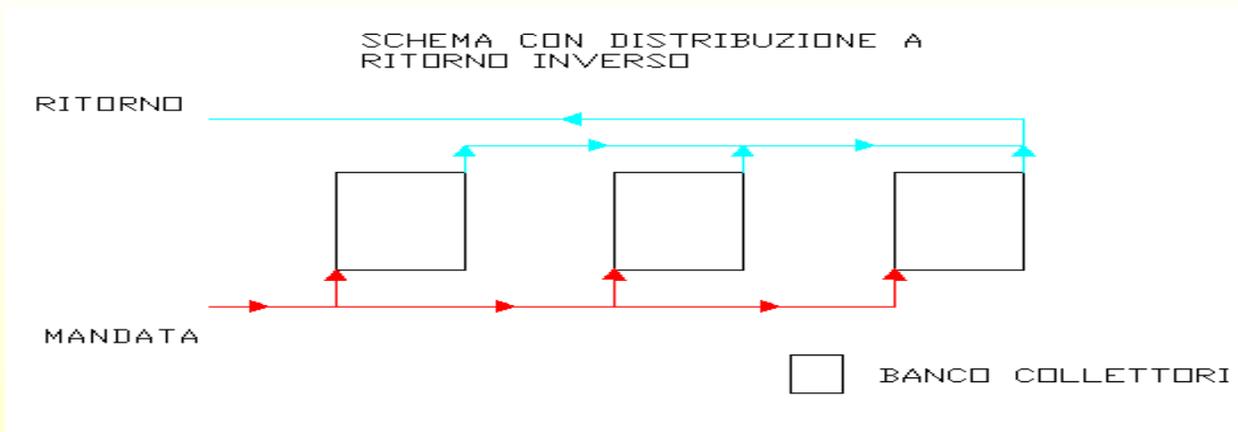
COLLETTORI

Devono essere componenti dalle caratteristiche e prestazioni adeguate (componenti certificati)

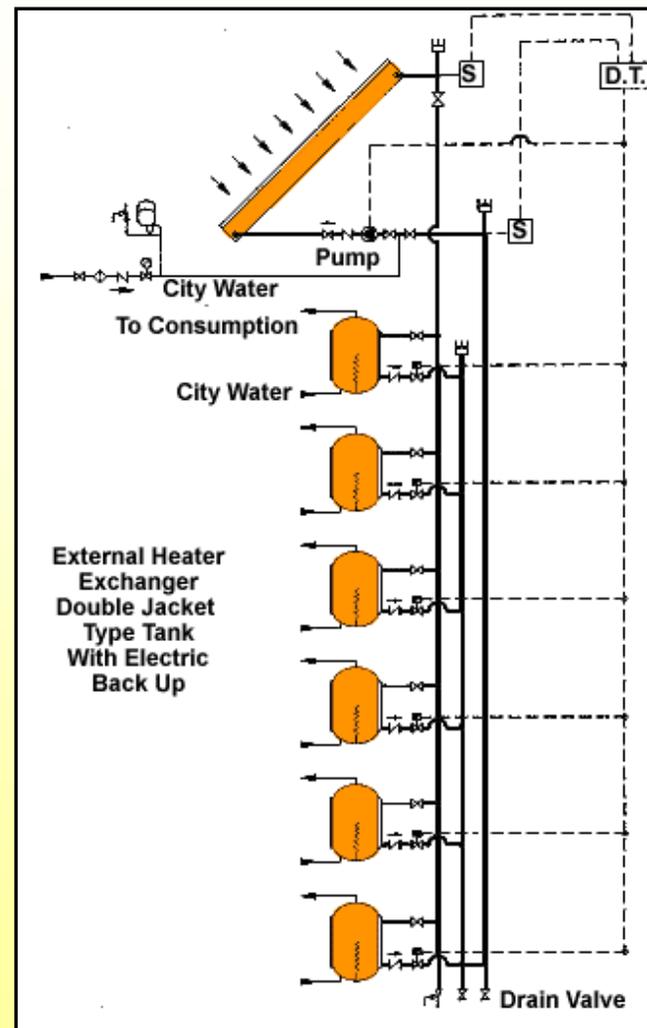
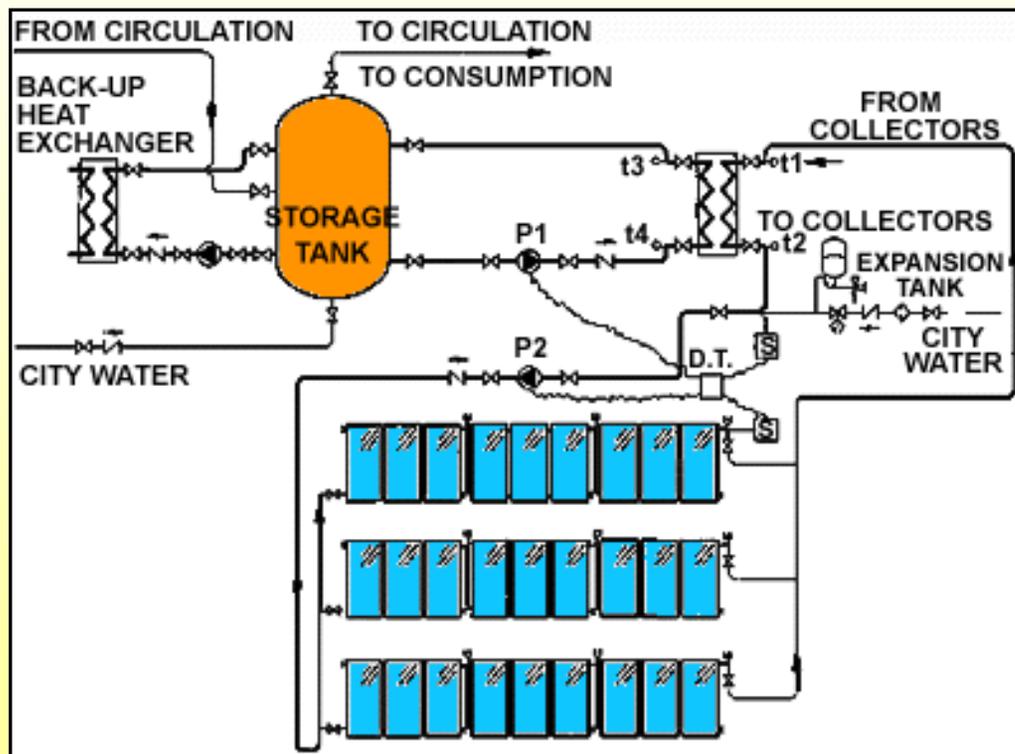
Alcuni suggerimenti utili nel dimensionamento di impianto:

- **portata massima** compresa tra **50 e 110 litri/ora per m²** di collettore
- **salto termico** tra la tubatura di mandata e la tubatura di ritorno al campo solare **< 15°C** per i sistemi a circolazione forzata di tipo tradizionale nelle massime condizioni di insolazione disponibili.
- per i collettori piani il numero di collettori in un banco (collettori in parallelo) **non dovrà essere maggiore di 6**

Il circuito idraulico



Alcuni esempi per utenze multiple



Stima del carico termico (caso a.c.s.)

$$L = nV\rho c_p \Delta T$$

Dove:

n numero persone
V fabbisogno a persona
 ΔT salto termico ($T_{calda} - T_{rete}$)

Stime più accurate possono basarsi sui dati forniti dalle bollette energetiche degli ultimi 3 anni.

	litri/giorno procapite	kWh _t /giorno procapite	NOTE
Abitazione	50	1,92	-
Ospedale	60	2,30	per posto letto
Case di riposo	40	1,53	-
Scuole	5	0,192	-
Caserme	30	1,15	-
Industrie	20	0,767	-
Uffici	5	0,192	-
Campeggi	30	1,15	per persona
Hotel alta cat.	160	6,14	per stanza
Hotel bassa cat.	100	3,84	per stanza
Palestre	35	1,34	per utente
Lavanderie	6	0,23	per kg lavato
Ristoranti	10	0,38	per pasto

Criteri generali di dimensionamento

Nel caso di impianti dedicati alla produzione di ACS e riscaldamento di piscine presso utenze ad uso continuativo la superficie va dimensionata in modo da coprire il carico richiesto nei mesi primaverili (Aprile – Maggio).

$$A = \frac{L}{H \cdot \eta}$$

dove

- L: carico termico calcolato nel mese di riferimento
- H: insolazione media mensile
- η : efficienza media dell'impianto (valore tipico **0.4**)

Nel caso di impianti ad uso stagionale, è preferibile dimensionare il campo solare in modo da garantire la copertura del carico nei mesi a più alta insolazione.

La frazione solare

In generale occorre integrare la fonte solare con una ausiliaria. La caratterizzazione energetica degli impianti solari, e di conseguenza il loro dimensionamento, si basa sul calcolo della frazione solare.

$$f = \frac{Q_{sol}}{L} = 1 - \frac{Q_{aux}}{L}$$

dove:

L	fabbisogno complessivo nel mese
Q _{sol}	energia utile fornita dalla sistema solare
Q _{aux}	energia fornita dalla fonte ausiliaria

La media pesata delle frazioni solari mensili fornisce quella annuale:

$$F = \frac{\sum f_i L_i}{\sum L_i}$$

Metodi di calcolo della frazione solare

Metodi esatti:

- il sistema solare è caratterizzato risolvendo rigorosamente le equazioni del bilancio di energia e massa per ogni componente;
- richiedono dati di input dettagliati (ad esempio valori orari dei parametri meteorologici) ed accurata programmazione, possibili solo ad operatori aventi una conoscenza approfondita dell'impianto e della metodologia;
- il metodo più conosciuto è il **TRNSYS**.

Metodi semiempirici:

- si utilizzano relazioni empiriche semplificate, ma validate con un metodo esatto, per il calcolo di alcuni parametri fondamentali;
- necessitano di dati di input medi (ad esempio valori dei parametri meteorologici su base mensile) ed il loro utilizzo è relativamente semplice, ma sono attendibili solo per il tipo di impianto e l'intervallo di valori dei parametri, in cui sono state validate le relazioni empiriche;
- il metodo più diffuso è l' **f-Chart**.

Metodi sperimentali:

- questi metodi sono basati unicamente su dati sperimentali ottenuti in diverse condizioni operative e climatiche;
- il metodo CSTG (o *Input-Output Method*) è il più comune.

Metodo *f-Chart*

Dalle equazioni di bilancio si ricava per la frazione solare mensile l'espressione seguente:

$$f = \frac{F'_R A}{L} \int_{\Delta t} [(\tau\alpha)G - U_L (T_{ref} - T_a)Z]^+ \Delta t \quad Z = \frac{T_i - T_a}{T_{ref} - T_a}$$

Dove:

- F'_R fattore di rimozione modificato per tenere conto dello scambiatore
- A area dei collettori
- $\tau\alpha$ prodotto effettivo trasmittanza-assorbanza
- G radiazione sul piano del collettore
- U_L coefficiente di perdita
- T_i temperatura del boiler
- T_a temperatura ambiente
- T_{rif} temperatura arbitraria (nel metodo della carta f posta pari a 100 °C)

NB. Il segno + sta ad indicare che nell'integrale vanno prese solo le quantità positive dato che il sistema di regolazione ferma il circolatore quando non si ha raccolta di energia utile.

Le variabili nel metodo f-Chart

Il fattore di temperatura Z è una funzione complessa delle condizioni meteorologiche, delle caratteristiche dell'impianto e del carico. La frazione f non può pertanto essere direttamente calcolata mediante la formula precedente, ma da tale relazione si ricava che essa è correlata alle seguenti variabili:

$$Y = \frac{F'_R A}{L} \int_{\Delta t} (\tau\alpha) G dt \approx \frac{F'_R A}{L} (\overline{\tau\alpha}) \overline{H} N$$

$$X = \frac{F'_R A}{L} \int_{\Delta t} U_L (T_{ref} - T_a) dt \approx \frac{F'_R A}{L} U_L (T_{ref} - \overline{T}_a) \Delta t$$

dove:

N giorni del mese
 Δt numero di secondi contenuti nel mese

Il tratto sulle variabili (prodotto trasmittanza-assorbanza, radiazione giornaliera media incidente su superficie inclinata, temperatura media ambiente) sta ad indicare che si tratta di valori medi su base mensile.

Le relazione del metodo f-Chart

Mediante regressione su valori di f calcolati con il *TRNSYS* per un gran numero di condizioni, si è verificato che il legame tra f , X e Y può essere espresso dalla correlazione empirica:

$$f = 1.09Y - 0.065X - 0.245Y^2 + 0.0018X^2 + 0.0215Y^3$$

Tale equazione vale per impianti per il riscaldamento ambientale e la produzione di acqua calda sanitaria, purché quest'ultimo carico non sia superiore al 20% di quello del riscaldamento. Nel caso in cui la produzione di acqua calda sia il carico prevalente o addirittura unico, occorre introdurre la temperatura minima richiesta per l'acqua calda T_{hw} e quella dell'acqua di rete T_r . Sempre il confronto con simulazioni effettuate con il *TRNSYS*, ha dimostrato che si ottengono risultati sufficientemente approssimati semplicemente sostituendo X con il parametro corretto X_c :

$$\frac{X_c}{X} = \frac{11.6 + 1.18T_{hw} + 3.86T_r - 2.32\bar{T}_a}{100 - \bar{T}_a}$$

I ipotesi del metodo f-Chart

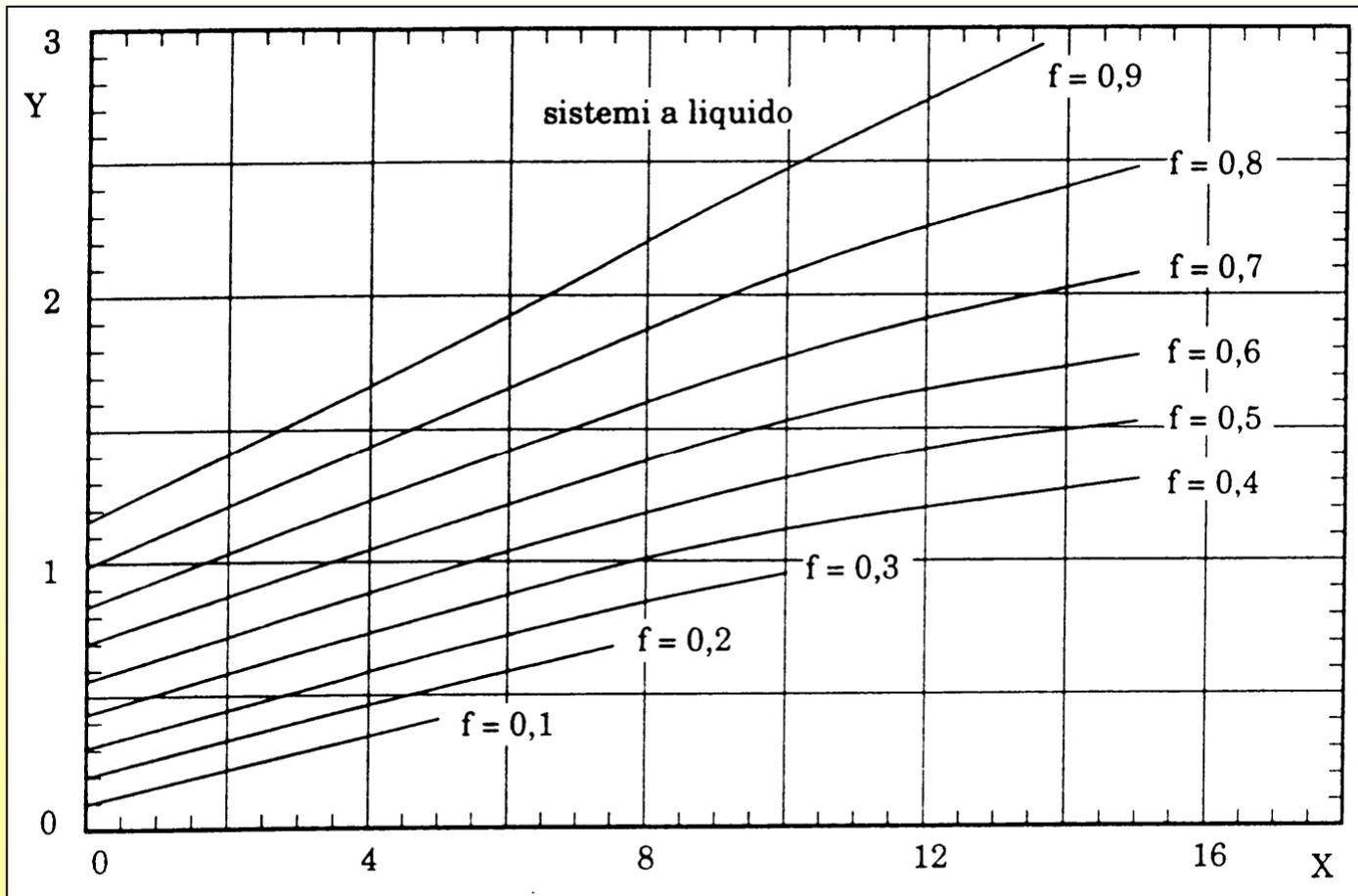
Le simulazioni per l'identificazione dei parametri sono state effettuate riferendosi a un sistema a due serbatoi, in cui il serbatoio di preriscaldamento solare ha una capacità di 75 litri/m² di collettore. Se la capacità ha un valore diverso V_{sp} il parametro X_c va sostituito da X_{cc} :

$$\frac{X_{cc}}{X_c} = \left(\frac{V_{sp}}{75} \right)^{-0.25}$$

Si è dimostrato che se il sistema è ad unico serbatoio con l'apparato ausiliario posto nella parte superiore il metodo di calcolo *f-Chart* fornisce ugualmente risultati attendibili, purché si consideri nei calcoli, come unico volume del serbatoio, quello della parte sottostante al sistema ausiliario.

Le procedure di calcolo sopra introdotte sono state sviluppate e tradotte nel programma di calcolo *f-Chart* presso il laboratorio di energia solare dell'università di Madison nel Wisconsin.

Curve iso-f



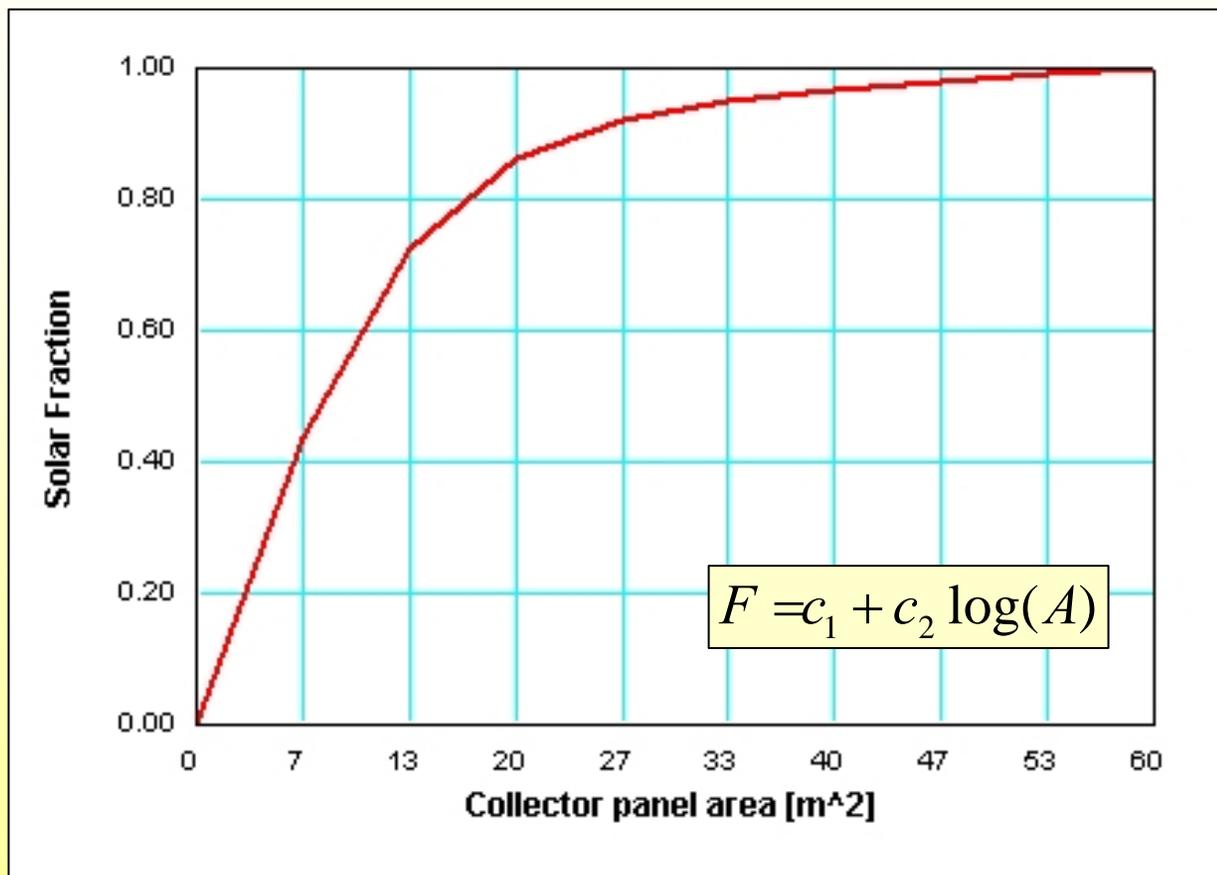
Dati di input del metodo f-Chart

I principali parametri di input richiesti dal programma *f-Chart* per un sistema per il riscaldamento di acqua sanitaria sono:

DATI METEOCLIMATICI	COLLETTORE	ACCUMULO
Insolazione globale mensile su piano orizzontale	Curva di efficienza del collettore	Volume dell'accumulo
Temperatura media ambiente su base mensile	Superficie del collettore e numero di pannelli	Litri di acqua consumati giornalmente
Temperatura dell'acqua di rete	Inclinazione ed azimuth del collettore	Temperatura di erogazione dell'acqua
	Dati relativi all'IAM	Efficienza dello scambiatore
	Numero di coperture	
	Portata specifica	
	Calore specifico del fluido termovettore	

L'output è costituito dai valori della frazione solare, dell'energia solare ed ausiliaria su base mensile ed annuale.

Andamento della frazione solare



Il criterio economico

Una volta determinato l'andamento di f in funzione dell'area, per il dimensionamento dell'impianto occorre considerare che:

- La frazione, e quindi l'energia solare raccolta, aumenta con l'area complessiva dei collettori, tendendo asintoticamente al valore unitario: la fonte solare in tal caso sarebbe in grado di sopperire all'intero fabbisogno energetico dell'utenza.
- Un impianto dimensionato in questo modo massimizzerebbe il risparmio energetico, ma non risulterebbe conveniente dal punto di vista economico, per gli elevati costi di investimento, direttamente proporzionali all'area installata.
- All'aumentare dell'area dunque si riduce l'apporto della fonte ausiliaria e quindi i costi di esercizio, ma aumenta il costo dell'impianto: al consueto prezzo dei collettori per la produzione di acqua calda, esiste in genere un valore ottimale per l'area (A_{opt}) di compromesso tra i due fattori in controtendenza suddetti.

Metodo del costo globale

Il costo globale attualizzato, CGA, di un impianto solare integrato durante la sua vita, è espresso da:

$$CGA = C_S \cdot P_1 + A \cdot E_c \cdot c_e \cdot P_2 + \frac{(1-f) \cdot L \cdot c_i \cdot P_3}{\eta_g}$$

$$C_S = (C_c + C_{PS} + m \cdot c_a) \cdot A$$

$$L = I_{load} \cdot N_{utenti} \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot 365/10^6$$

dove:

C_c	costo dei collettori [€/m ²]
C_{PS}	costo per strutture di sostegno, pompe e tubature [€/m ²]
m	massa del serbatoio di accumulo per m ² di collettore [kg/m ²]
c_a	costo specifico del serbatoio di accumulo [€/kg]
E_c	consumo annuale di energia per l'azionamento delle pompe [MJ/m ²]
c_e	costo dell'energia elettrica [€/MJ]
L	fabbisogno termico annuale [MJ]
ΔT	differenza di temperatura tra acqua erogata ed acqua di rete [°C]
c_i	costo dell'energia di integrazione [€/MJ]
n	vita economica dell'impianto [anni]
η_g	rendimento globale dell'impianto convenzionale

I parametri di attualizzazione

Nel caso di un utente privato che anticipi l'intero esborso iniziale e assumendo un valore del tasso di inflazione dell'energia uguale a quello generale si può porre:

$$P_1 = 1 + S_M \cdot P_2$$

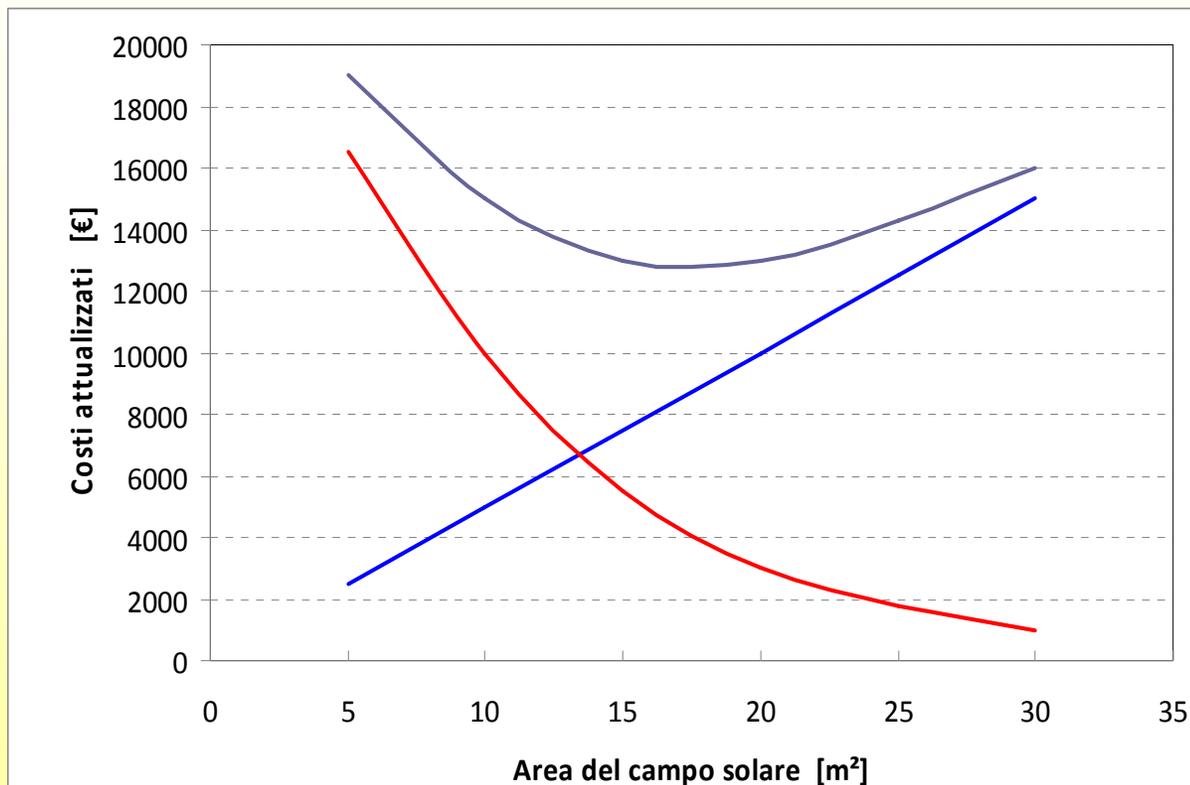
$$P_3 = P_2$$

$$P_2 = \begin{cases} FA(i,g,n) = \frac{1 - \left(\frac{1+g}{1+i}\right)^n}{\left(\frac{1-g}{1+g}\right)} & \text{se } i \neq g \\ FA(i,g,n) = n & \text{se } i = g \\ FA(i,0,n) = FA(i,n) = \frac{1 - (1+i)^{-n}}{i} & \text{se } g = 0 \end{cases}$$

dove:

- S_M frazione del costo iniziale per spese di manutenzione nel primo anno
- g tasso generale di inflazione
- i tasso di sconto del committente

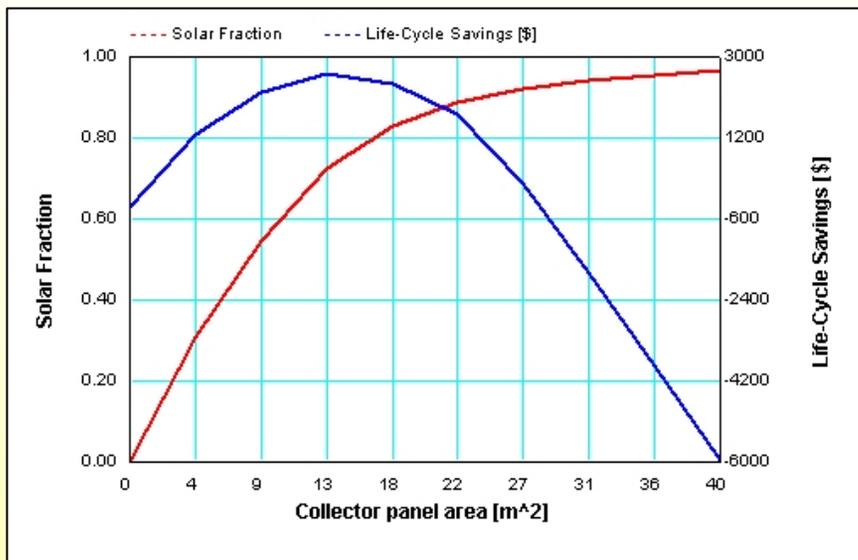
Andamento del CGA



$$A_{opt} = \frac{c_2 L c_i P_3}{(C_v P_1 + E_c c_e P_2) \eta_g}$$

- Costo impianto
- Fonte ausiliaria
- CGA

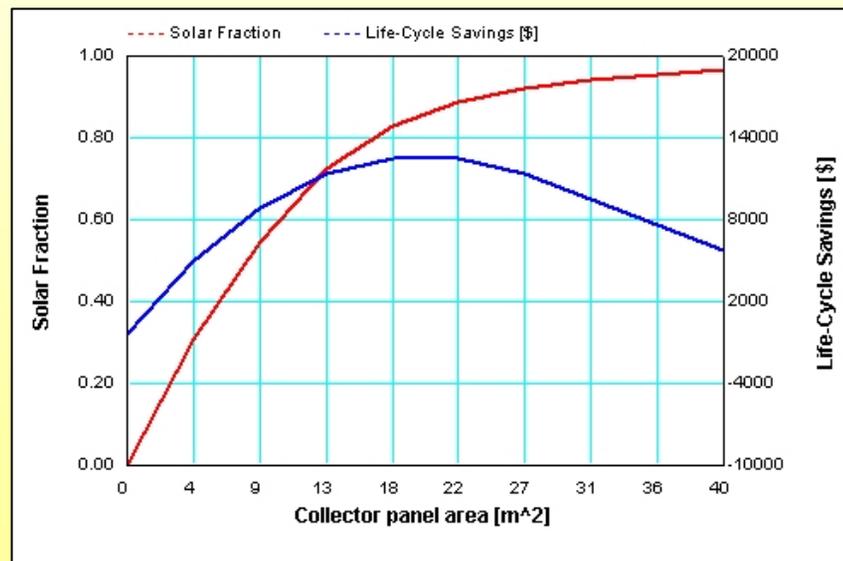
Esempi di analisi tecnico-economica



Integrazione a gas

Integrazione elettrica

Andamento del risparmio globale (*Life-Cycle Saving*) in funzione dell'area dei collettori, valutato con il metodo *f-Chart* per diverse fonti ausiliarie.



	NORD		CENTRO		SUD		Note
	Bolzano		Roma		Palermo		
Inclinazione	pari alla latitudine		pari alla latitudine		pari alla latitudine		Ottimale per una distribuzione uniforme del carico per l'intero anno. +/- 10-15° per favorire rispettivamente i mesi invernali o estivi per le utenze stagionali.
Radiazione disponibile (kWh/m ²)	1460		1720		1920		Valori su piano inclinato
Dati							
Componenti nucleo familiare	4		4		4		
Fabbisogno di ACS procapite (litri/persona)	50		50		50		
Area totale (m ²)	4,8		4,0		3,2		
Frazione solare	80%		80%		80%		
Costo medio dei collettori (€/m ²)	700		700		700		
Risultati							
Carico termico per ACS (kWh/anno)	3392		2968		2544		Temperatura utenza 45°C
Produzione specifica di calore (kWh/m ²)	584		688		768		Valutata considerando un'efficienza media annua del 40%
Investimento iniziale (€)	3360		2800		2240		
Fonte ausiliaria	Elettricità	Gas	Elettricità	Gas	Elettricità	Gas	
Rendimento di conversione	100%	90%	100%	90%	100%	90%	
Costo della fonte ausiliaria (€/kWh)	0,18	0,08	0,18	0,08	0,18	0,08	
Risparmio economico (€/anno)	488	241	427	211	366	181	
Tempo di ritorno (anni)	6,9	13,9	6,6	13,3	6,1	12,4	Ammortamento semplice senza incentivi
Tempo di ritorno con incentivi (anni)	4,8	9,8	4,6	9,3	4,3	8,7	Ammortamento semplice con incentivo in conto capitale del 30%
Tempo di ritorno con incentivi (anni)	3,1	6,3	2,9	6,0	2,8	5,6	Ammortamento semplice con incentivo IRPEF del 55%

Parte III

Certificazione dei collettori e sistemi solari

Cenni sulla normativa tecnica

Normativa tecnica nel settore del solare:

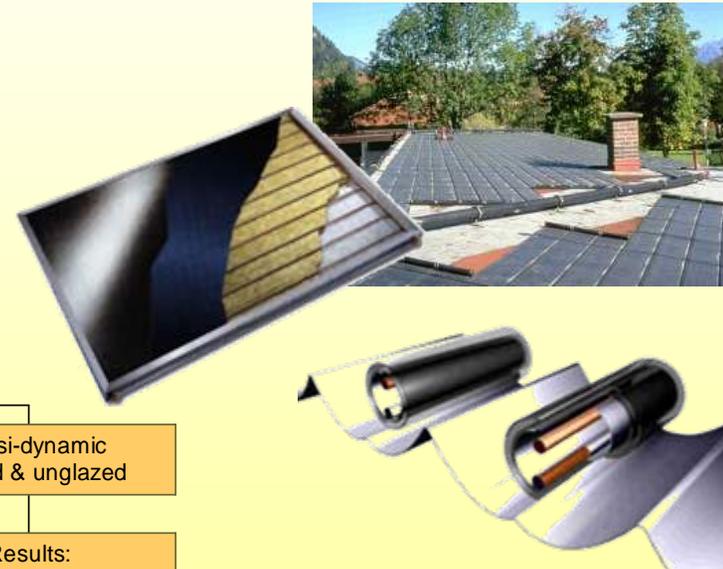
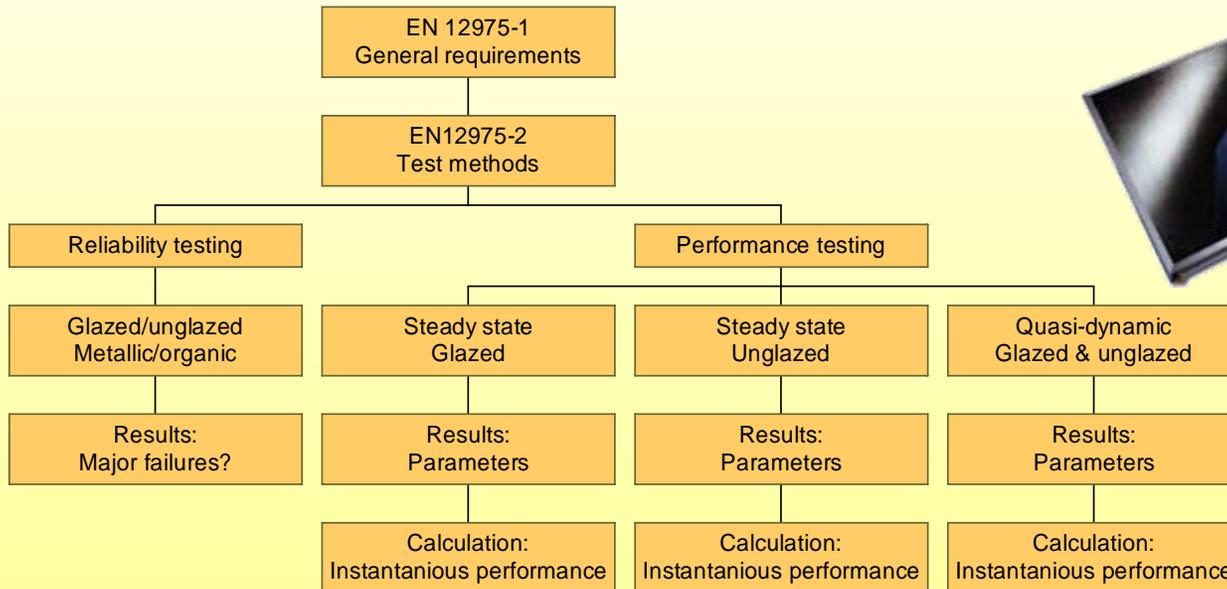
Tipologia	Standard
<p>COLLETTORI SOLARI</p> <ul style="list-style-type: none"> • Collettori solari a liquido 	<p>EN 12975-1 e 2</p>
<p>SISTEMI SOLARI del tipo <i>Factory Made</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sistemi a circolazione naturale • Sistemi a circolazione forzata di piccola taglia per la produzione di ACS • Sistemi integrati collettore-accumulo 	<p>EN 12976-1 e 2</p>
<p>SISTEMI SOLARI del tipo <i>Custom Built</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Sistemi a circolazione forzata per la produzione di ACS e/o climatizzazione degli ambienti (<i>Comby-system</i>) • Sistemi a circolazione forzata di grandi dimensioni 	<p>CEN/TS 12977-1 -2 -4 -5 EN 12977-3</p>

Standard EN 12975

Thermal solar systems and components – Solar collectors

Campo di applicazione: Collettori vetrati piani, Collettori a tubi evacuati, Collettori scoperti

Articolazione della norma:



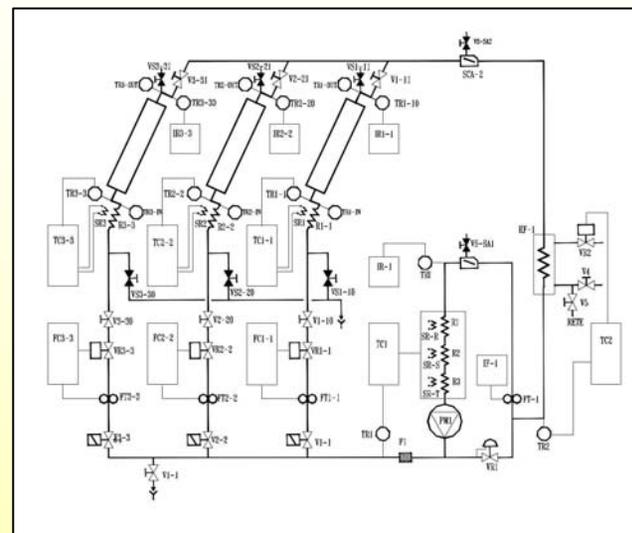
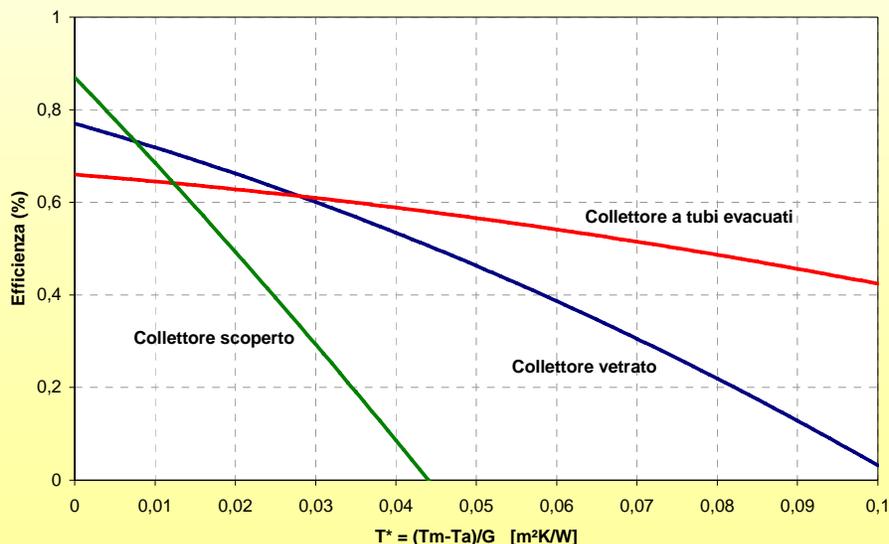
EN 12975-2:2006

Thermal solar systems and components – Solar collectors – Test methods

Test	Metodo
Caratterizzazione delle prestazioni termiche	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Efficienza termica in stato stazionario o resa energetica in condizioni transitorie ▪ Costante di tempo (opzionale) ▪ Capacità termica effettiva ▪ IAM - modificatore dell'angolo d'incidenza ▪ Perdite di carico 	EN 12975-2:2006 – par. 6
Test di qualificazione	
Resistenza alla pressione	EN 12975-2:2006 – par. 5.2
Resistenza alle alte temperature	EN 12975-2:2006 – par. 5.3
Esposizione	EN 12975-2:2006 – par. 5.4
Shock termico esterno	EN 12975-2:2006 – par. 5.5
Shock termico interno	EN 12975-2:2006 – par. 5.6
Prova di pioggia	EN 12975-2:2006 – par. 5.7
Carico meccanico	EN 12975-2:2006 – par. 5.9
Resistenza all'impatto (opzionale)	EN 12975-2:2006 – par. 5.10
Ispezione finale	EN 12975-2:2006 – par. 5.11

EN 12975-2: Prestazioni termiche

Consiste nella determinazione dell'efficienza istantanea, in condizioni di stato stazionario, per diverse temperature. L'efficienza del collettore viene espressa sia in forma lineare che in forma quadratica, applicando una regressione, secondo il metodo dei minimi quadrati, ai valori di rendimento misurati.



Schema del circuito di prova dei collettori

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{(T_m - T_a)}{G} - a_2 G_0 \left[\frac{(T_m - T_a)}{G} \right]^2$$

EN 12975-2: Prestazioni termiche

Ulteriori prove richieste per la caratterizzazione delle prestazioni termiche di un collettore:

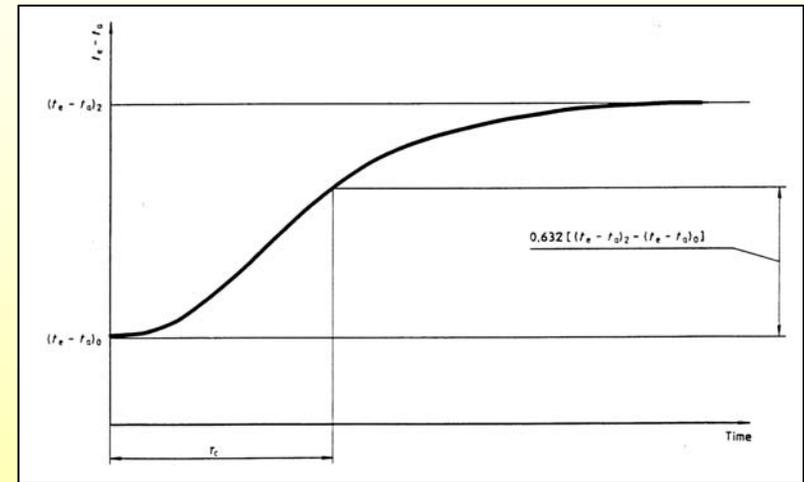
Determinazione della costante di tempo:

$$\tau \leftrightarrow 0.632 \left[(t_u - t_a)_2 - (t_u - t_a)_1 \right]$$

Determinazione della costante di tempo:

$$C \frac{dT_m}{dt} = AG \eta_0 - \Gamma c_p \Delta T - AU_c (T_m - T_a)$$

$$C = \frac{A \eta_0 \int_{t_1}^{t_2} G dt - \Gamma c_p \int_{t_1}^{t_2} \Delta T dt - AU_c \int_{t_1}^{t_2} (T_m - T_a) dt}{T_{m2} - T_{m1}}$$



Determinazione dell' Incident Angle Modifier (IAM):

$$K_{\theta} = \frac{(\tau \alpha)_e}{(\tau \alpha)_{e,n}}$$

EN 12975-2: Test di qualificazione

Test di resistenza alle alte temperature – Test di esposizione – Shock termici esterni ed interni



Scopo: Verificare la resistenza del collettore a:

- Irraggiamento elevato ($> 1000 \text{ W/m}^2$) in assenza di acqua;
- Esposizione prolungata (almeno 30 giorni) agli agenti atmosferici in assenza di fluido (stagnazione a secco);
- Resistenza agli shock termici sia interni che esterni.

EN 12975-2: Test di qualificazione – Prova di pioggia

Scopo: evidenziare l'eventuale presenza di infiltrazioni a seguito dell'azione di una pioggia battente

Dispositivo utilizzato: Box per la simulazione della pioggia



Articolazione del test:

- Esposizione del collettore ad una pioggia battente per una durata non inferiore alle 4 h, con ricircolo di acqua calda ($T > 50^{\circ}\text{C}$) all'interno del collettore.

Metodo di valutazione dei risultati:

- Ispezione visiva (individuazione di aree con formazione di condensa)
- Peso del collettore (test superato se variazione inferiore a **30 g/m²**)

EN 12975-2: Test di qualificazione – Carico meccanico

Scopo: simulare l'azione di carichi positivi e negativi esercitati dal vento e/o della neve sulla copertura del collettore e sul sistema di fissaggio.

Dispositivo utilizzato: sistema a ventose, distribuite uniformemente sulla superficie del collettore, collegate a cilindri azionati ad aria compressa.



Articolazione del test:

- Pressioni positive sulla copertura del collettore
- Pressioni negative con sollecitazione simultanea del sistema di fissaggio della copertura e sistema di ancoraggio del collettore

Campo di pressioni applicate:

- 100 – 1000 Pa con passo 250 Pa

EN 12975-2: Test di qualificazione – Prova di impatto

Scopo: simulare gli effetti della grandine sulla copertura del collettore

Dispositivo utilizzato: sistema ad impatto verticale



Articolazione del test:

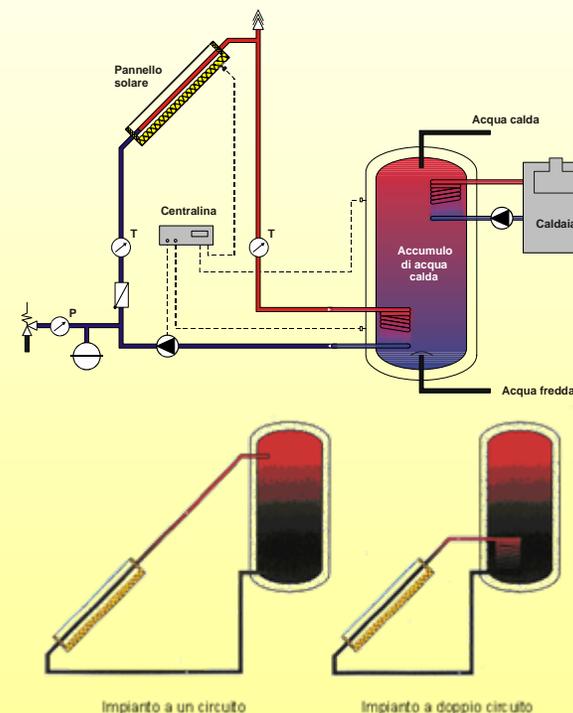
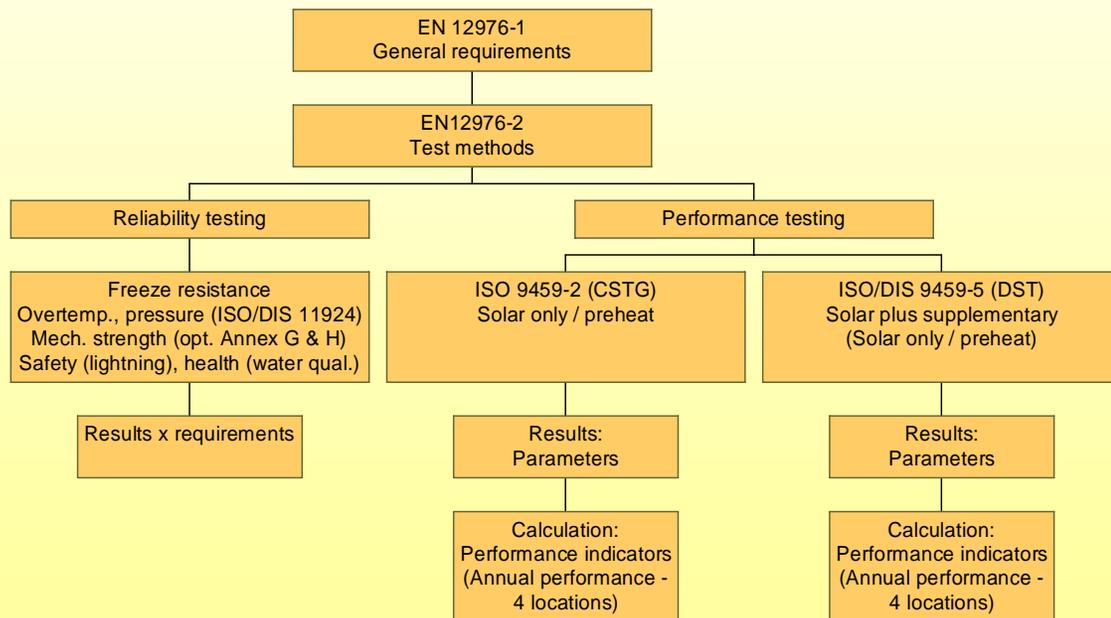
- Serie di 10 impatti realizzati con una sfera di acciaio da 150 g a partire da una quota di 40 cm fino a 2 m con passo 20 cm.

Standard EN 12976

Thermal solar systems and components – Factory made systems

Campo di applicazione: Sistemi a circolazione naturale, Sistemi a circolazione forzata per la produzione di ACS, Sistemi integrati collettore-accumulo

Articolazione della norma:



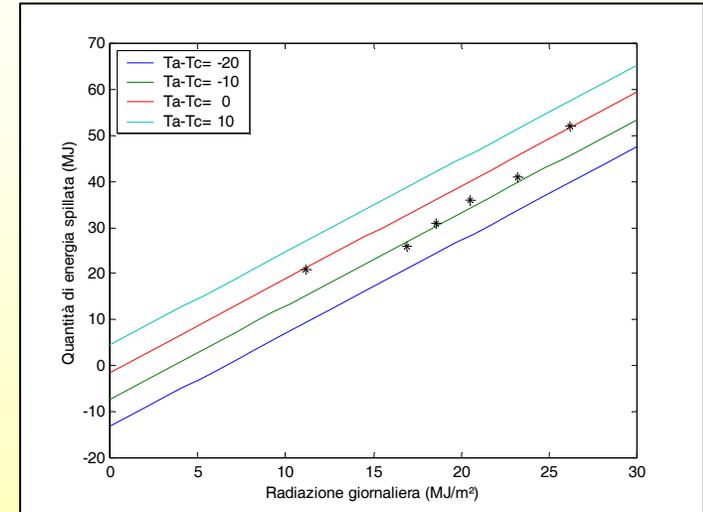
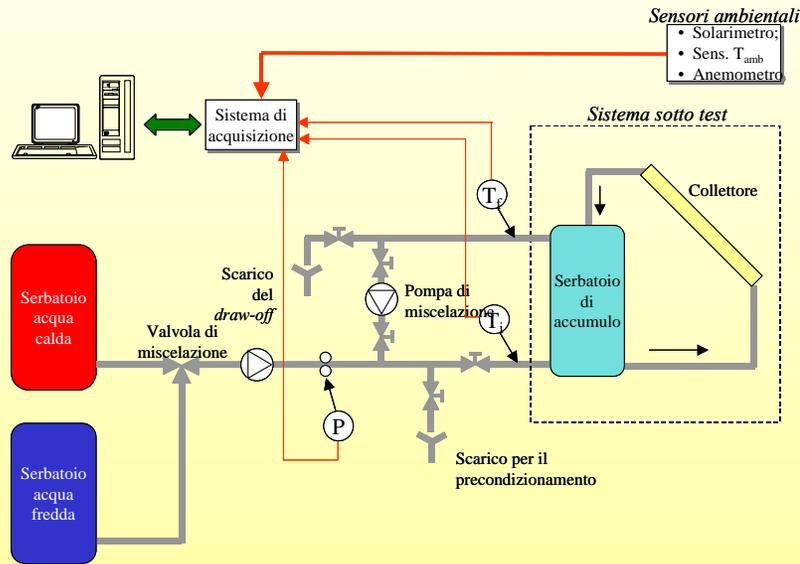
Standard EN 12976

Thermal solar systems and components – Factory made systems

Test	Metodo
Resistenza al gelo	EN 12976-2:2006 – par. 5.1
Protezione contro il surriscaldamento	EN 12976-2:2006 – par. 5.2
Resistenza alla pressione	EN 12976-2:2006 – par. 5.3
Inquinamento acqua potabile	EN 12976-2:2006 – par. 5.4
Protezione ai fulmini	EN 12976-2:2006 – par. 5.5
Dispositivi di sicurezza	EN 12976-2:2006 – par. 5.6
Etichettatura	EN 12976-2:2006 – par. 5.7
Prestazioni termiche del sistema	EN 12976-2:2006 – par. 5.8
Capacità del sistema ausiliario di coprire il carico	EN 12976-2:2006 – par. 5.9
Dispositivo antiritorno	EN 12976-2:2006 – par. 5.10
Sicurezza elettrica	EN 12976-2:2006 – par. 5.11

EN 12976-2: Caratterizzazione delle prestazioni termiche

Consiste nella valutazione dell'energia accumulata dal sistema in diverse condizioni meteo-climatiche e a diverse temperature di carica del sistema.

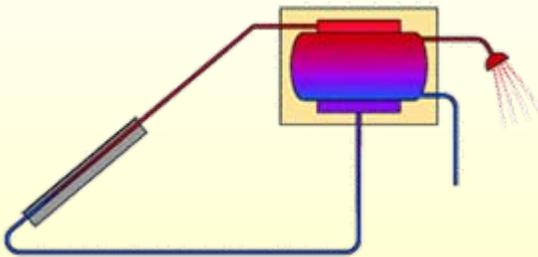


$$Q = \alpha_0 + \alpha_H H + \alpha_T (T_a - T_c)$$

L'energia Q accumulata dal sistema viene correlata linearmente all'energia H giunta sul piano del collettore e alla differenza tra T_{amb} e T_c

EN 12976-2: Caratterizzazione delle prestazioni termiche

Esempio di applicazione del metodo CSTG



Località: TRISAIA

Caratteristiche del sistema:

Area collettore = 2 m²

Inclinazione = 45°

Volume serbatoio = 180 litri

Coeff. Di perdita (Us) = 2.9 W/K

Mese	\bar{H} [MJ/m ²]	\bar{H}_{tilt} [MJ/m ²]	Carico termico [MJ]	Output energetico [MJ]	Frazione solare [-]
Gennaio	6,9	12,2	746	336	0,45
Febbraio	9,4	13,8	683	348	0,51
Marzo	14,2	17,2	746	515	0,69
Aprile	18,3	18,4	697	551	0,79
Maggio	21,9	19,6	685	637	0,93
Giugno	23,9	20,2	629	629	1
Luglio	23,6	20,5	616	616	1
Agosto	20,7	19,8	607	607	1
Settembre	16,2	18,1	597	597	1
Ottobre	11,7	16,1	642	520	0,81
Novembre	7,7	13	658	369	0,56
Dicembre	6,3	11,8	711	313	0,44
	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh]	[kWh]	[-]
Annuale	1531	1697	2227	1677	0,75

Indicatori delle prestazioni su base annuale

Indicatori delle prestazioni per sistemi solo-solari o di pre-riscaldamento
Valutazione su base annuale per una richiesta d'acqua calda sanitaria di **140 litri/giorno**

Sito (latitudine)	Q_D MJ	Q_L MJ	f_{sol}	Q_{par} MJ
STOCCOLMA (59.6° N)	7808	3360	0.43	-
WÜRZBURG (49.5° N)	7487	3672	0.49	-
DAVOS (46.8° N)	8471	4752	0.56	-
ATENE (38.0° N)	5818	3728	0.64	-
BOLZANO (46.5° N)	7486	4585	0.61	-
ROMA (42.1° N)	7059	5229	0.74	-
PALERMO (38.1° N)	6631	5425	0.82	-

- Q_D Domanda di acqua calda sanitaria
 Q_L Energia termica utile estratta dal sistema
 Q_{par} Energia parassitica
 f_{sol} Frazione solare annua

Perché certificare

Sebbene in Italia non vi sia l'obbligo di certificare i collettori ed i sistemi solari termici per la loro commercializzazione, l'ottenimento di tale attestazione di qualità del prodotto, consente di:

- Accedere alle forme di incentivazione previste per tale tecnologia (**detrazione fiscale del 55%**)
- Ottenere l'uso del **marchio di qualità europeo "Solar Keymark"**, requisito indispensabile per l'accesso, ad esempio, ad alcuni mercati europei
- Possedere i requisiti richiesti da **normative cogenti** nel settore del risparmio energetico (es. prUNI/TS 11300 – parte 4: "Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti e preparazione acqua calda sanitaria")

Meccanismi di incentivazione

Con riferimento al D.M. 19.02.2007 (*"Disposizioni in materia di detrazioni per le spese di riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente"* e s.m.i.), le tipologie di pannelli solari che possono beneficiare del regime fiscale agevolato (detrazione d'imposta del 55% in 10 anni) sono:

- quelli destinati alla *"produzione di acqua calda per usi domestici o industriali e per la copertura del fabbisogno di acqua calda in piscine, strutture sportive, case di ricovero e cura, istituti scolastici e università"* (ai sensi dell'art. 1, comma 349, della legge 27 dicembre 2006, n. 296)
- sono, inoltre, ammessi alla detrazione (art. 8 – *"Asseverazione degli interventi di installazione di pannelli solari"*), i pannelli solari in possesso di certificazione di qualità conforme alle norme **UNI EN 12975** o **UNI EN 12976** rilasciata da un **laboratorio accreditato**.

Per l'ottenimento dell'incentivo occorre

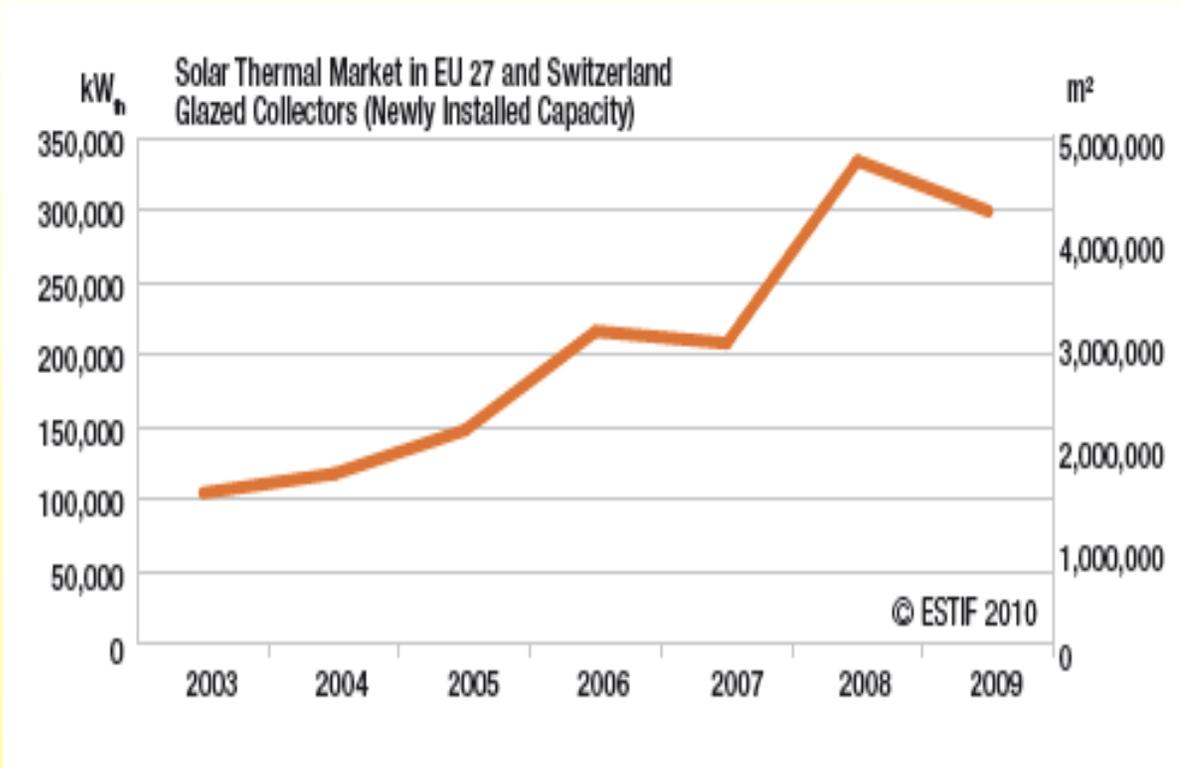
- la certificazione del solo collettore secondo la norma UNI EN 12975 nel caso di sistemi solari a circolazione forzata o a circolazione naturale con collettore separato dall'accumulo
- la certificazione secondo la norma UNI EN 12976 nel caso di sistemi solari in cui l'unità di accumulo non è disgiungibile dal collettore (sistemi integrati - ICS)

Parte IV

Sistemi solari termici

Mercato e condizioni di sviluppo

Mercato europeo



➤ **Mercato nel 2009:**

300 MW_{th}



4,2 milioni m²

➤ **Installato nel 2009:**

22 GW_{th}

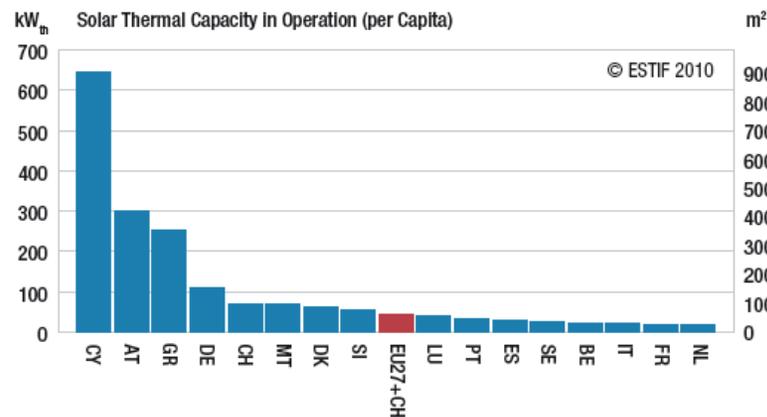
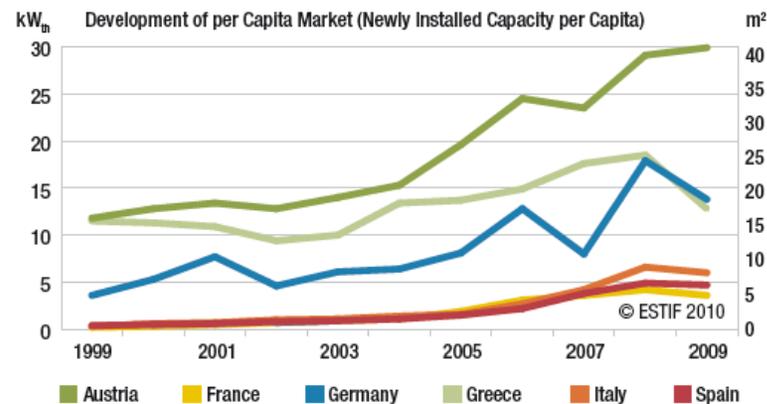
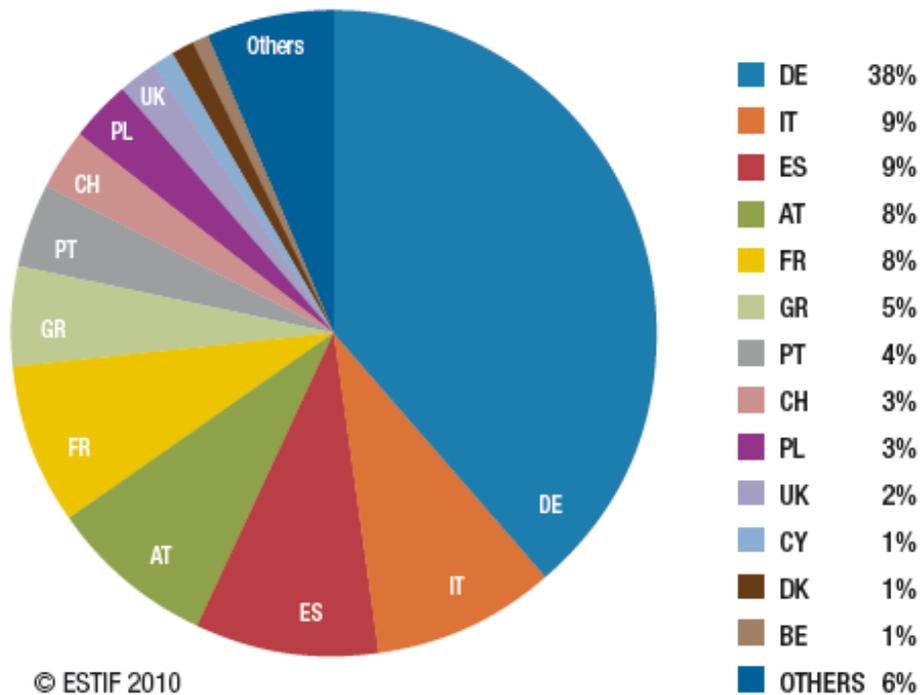


31,5 milioni m²

Fonte: ESTIF - Solar Thermal Markets in Europe (2010)

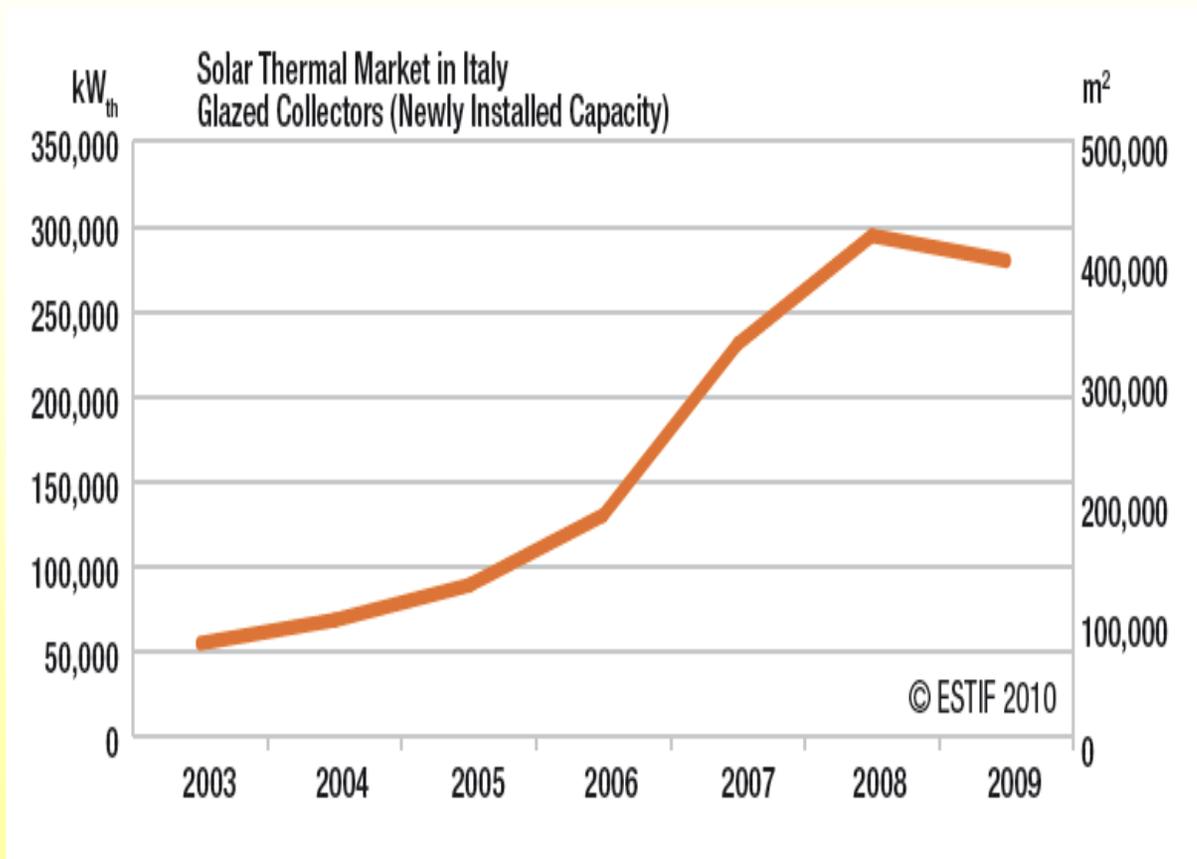
Mercato europeo

Shares of the European Solar Thermal Market (Newly Installed Capacity)



Fonte: ESTIF - Solar Thermal Markets in Europe (2010)

Andamento del mercato nazionale



- **Secondo mercato a livello EU**
- **Mercato nel 2009:**
280 MW_{th}
↓
400.000 m²
- **Prodotti italiani:**
~30%
- **Stima al 2010:**
Mercato stabile

Fonte: ESTIF

Mercato nazionale

Market Size in terms of Solar Thermal Capacity (KW_{th}) and in terms of Collector Area (m^2)

	In Operation ²		Market (=Newly Installed)					Annual Evolution of the Market	
	2009		2007	2008	2009			2009/2008	
	Total Glazed	Total Glazed	Total Glazed	Total Glazed	Flat Plate	Vacuum Collectors	Total Glazed	Total Glazed	
	m^2	$kW(th)$	m^2	m^2	m^2	m^2	$kW(th)$	%	
Italy	2,006,230	1,404,361	330,000	421,000	400,000	350,000	50,000	280,000	-5%

Fonte: ESTIF - Solar Thermal Markets in Europe (2010)

Condizioni per lo sviluppo del solare

La tecnologia del solare termico, che ha raggiunto ormai un livello di sufficiente maturità, trova in Italia condizioni particolarmente favorevoli:

- forte ricorso nel riscaldamento dell'acqua sanitaria all'elettricità (8.000.000 di scaldabagni elettrici)
- idoneità della maggioranza degli edifici ad uso residenziale (caratterizzata da 1-2 unità abitative)
- esposizione climatica
- forte incentivazione economica

Settori di interesse

■ **Settore civile**

- Produzione di acqua calda sanitaria (collettori a bassa temperatura)
- Sistemi combinati per la climatizzazione invernale (**Comby-system** che utilizzano collettori a bassa temperatura)
- Climatizzazione estiva degli ambienti (**Solar cooling** applicato al settore residenziale e commerciale con collettori a bassa e/o media temperatura)

■ **Settore industriale**

- Produzione di calore di processo a bassa e media temperatura
- Produzione di freddo per l'industria alimentare (media temperatura)
- Produzione di acqua dissalata mediante processi termici (bassa e media temperatura)

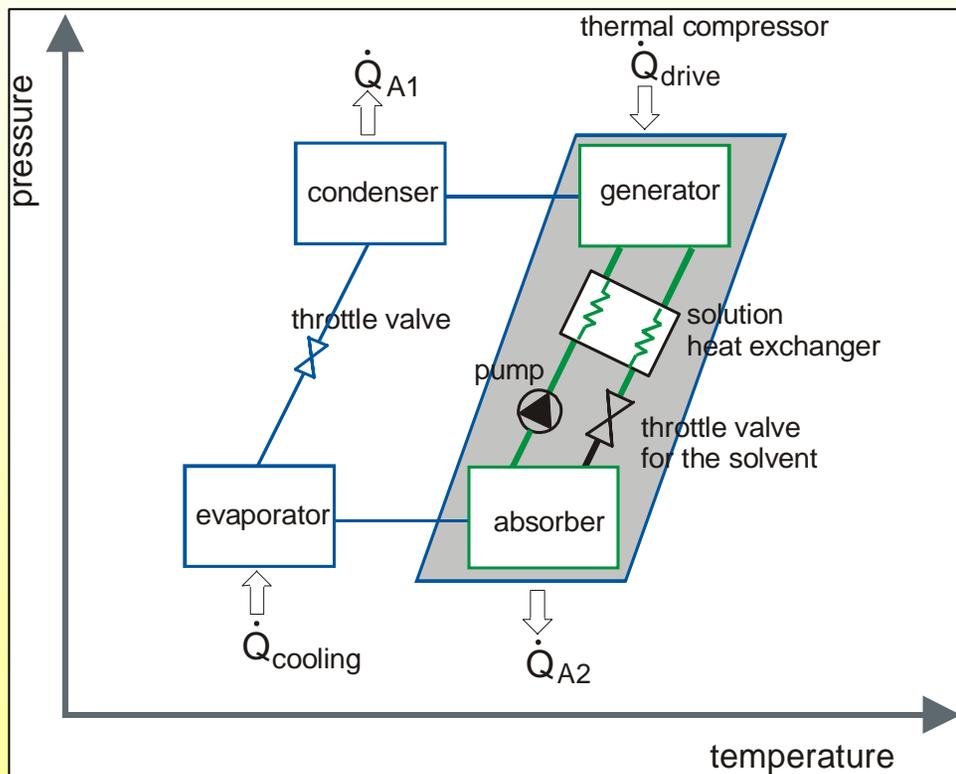
Solar-cooling: le tecnologie

	Cicli chiusi Produzione acqua refrigerata		Cicli aperti Condizionamento aria diretto	
Tipo di sorbente	solido	liquido	solido	liquido
				
Tipici materiali in uso	Acqua - Silicagel, Ammoniac - Sali A.	Acqua - LiBr, Ammoniac - acqua	Acqua - Silicagel, Acqua - Cl di Litio	Acqua - Cloruro di Calcio, Acqua - Cloruro di Li
Tecnologie disponibili sul mercato	Macchine ad Adsorbimento	Macchine ad Assorbimento	Raff. Evaporativo con Ad-assorbimento	-
Potenza frigorifera [kW]	7 - 430 kW	4.5 kW fino >5 MW	20 kW - 350 kW (pro Modul)	-
Produttori	2 produttori giapponesi	USA, Asia; solo poche piccole capacità	ca. 5 produttori di rotor; molti UTA	
Efficienza (COP)	0.3-0.7	0.6-0.75 (1-effetto) < 1.2 (2-effetto)	0.5 fino >1	fino >1
Tipiche temperature di alimentazione	60-95°C	80-110°C (1-effetto) 130-160°C (2-effetto)	45-95°C	45-70°C
Tecnologie solari	CTE, CP	CTE, coll. a concent.	CP, CA	CP, CA

Fonte: Politecnico di Milano

Solar-cooling: le tecnologie

Sistemi ad assorbimento



Il ciclo frigorifero è basato su un processo di assorbimento nel quale un fluido igroscopico assorbe i vapori del fluido refrigerante (**Compressore termico**).

Il ciclo è chiuso e consente di produrre acqua refrigerata.

Temperatura tipiche di funzionamento:

- 70-90°C (singolo effetto)
- 130-160°C (doppio effetto)

Concentratori a media temperatura

Concentratori parabolici lineari ad inseguimento

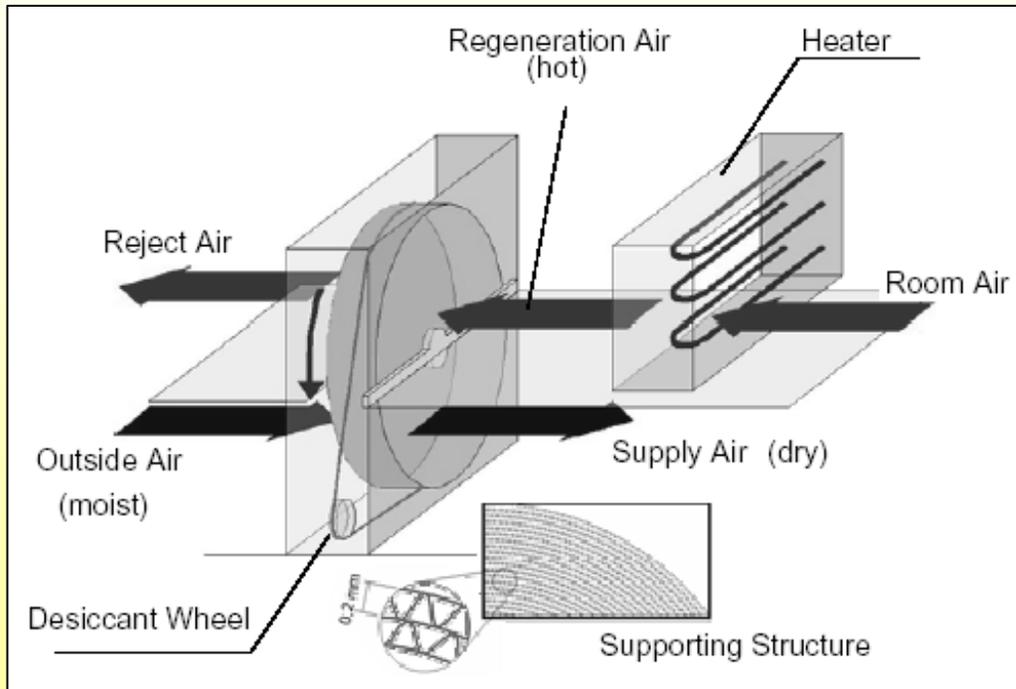


Sistema a specchi lineari di Fresnel



Solar-cooling: le tecnologie

Sistemi DEC

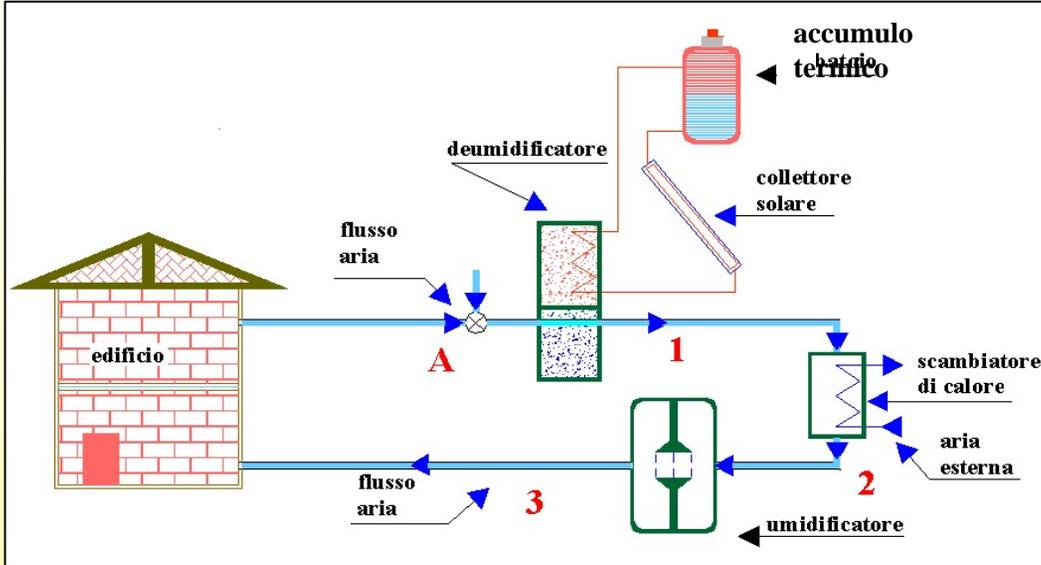


Il ciclo frigorifero è basato su un processo di umidificazione / deumidificazione che utilizza materiali igroscopici solidi o liquidi.

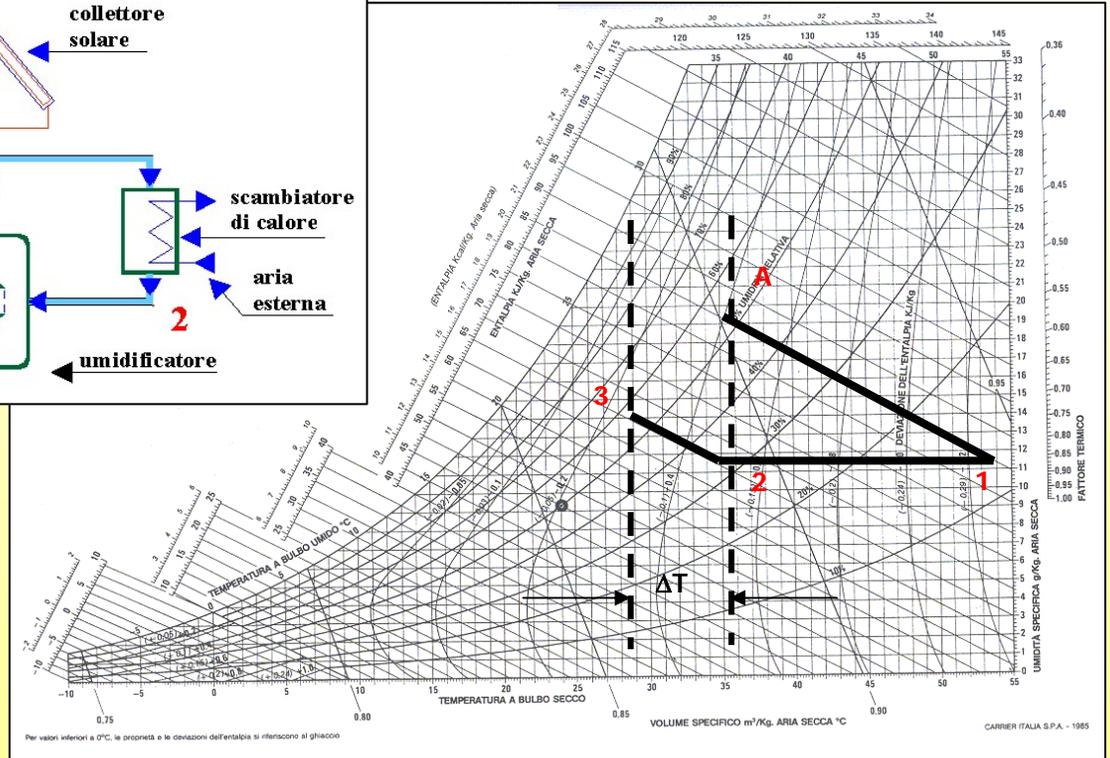
Il ciclo è aperto e consente di trattare direttamente l'aria da condizionare.

Temperatura tipiche di funzionamento: 60-70°C

Esempio di sistema DEC



**Diagramma
Psicrometrico
di Carrier**



Sviluppi tecnologici futuri

❑ Collettori solari ad alta efficienza

- Miglioramento delle proprietà ottiche dei materiali (*coating* selettivi innovativi, trattamenti anti-riflesso)
- Miglioramento delle prestazioni termo-fluidodinamiche dei collettori
- Isolamenti termici innovativi (utilizzanti ad es. nanotecnologie)
- Uso di materiali polimerici
- Miglioramento dei sistemi di inseguimento e concentrazione per applicazioni a media ed alta temperatura

❑ Accumuli

- Accumuli chimici
- Accumuli stagionali (serbatoi interrati, accumulo diretto nel terreno con scambiatori interrati)
- Accumuli in transizione di fase

❑ Sistemi ibridi termo/fotovoltaici

Per ulteriori informazioni...



**Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo
sviluppo economico sostenibile**

Centro Ricerche TRISAIA

Laboratorio di certificazione collettori e sistemi solari

<http://www.enea.it>

<http://www.trisaia.enea.it>