

APPUNTI DI TERMOTECNICA

ENERGIA SOLARE TERMICA

Prof. M. Mariotti

Dipartimento di Fisica Tecnica

ANNO ACCADEMICO 2008-2009

1 INTRODUZIONE

Solare termico indica un sistema in grado di trasformare l'energia irradiata dal sole in energia termica, ossia calore, che può essere utilizzato negli usi quotidiani, quali ad esempio il riscaldamento dell'acqua sanitaria o il riscaldamento degli ambienti. Nel caso si utilizzi il calore del sole per produrre corrente tramite l'evaporazione di fluidi vettori che alimentano turbine collegate ad alternatori si parla di solare termodinamico.

Gli impianti solari termici sono i sistemi che permettono di catturare l'energia solare, immagazzinarla e usarla nelle maniere più svariate. Gli impianti si distinguono in:

- impianti per produzione di energia elettrica (solare termodinamico)
- impianti a media temperatura
- impianti a bassa temperatura (fino a 120°C)

2 UTILIZZI DELL'ENERGIA SOLARE TERMICA

2.1 SOLARE TERMODINAMICO

Esistono due tipologie di solare termodinamico: sistemi a centrale riceitrice e sistemi a cilindri parabolici.

Sistemi a centrale riceitrice



Solar One 10 MWe Central Receiver Power Plant a Daggett California

Questa tipologia utilizza specchi che vengono puntati verso un serbatoio posto alla sommità di una torre. L'energia solare concentrata dagli specchi fa evaporare il liquido contenuto nel serbatoio che inviato alla turbina aziona l'alternatore per generare energia elettrica. Questa tipologia di centrale termica consente di raggiungere temperature elevate e quindi consente di utilizzare come liquido altri elementi oltre all'acqua innalzando l'efficienza complessiva del sistema.

Questa tipologia di centrali è utilizzata da anni negli Stati Uniti, negli ultimi anni in Spagna si sono autorizzate la costruzione di alcune centrali di questo tipo e nel dicembre 2007 anche il governo italiano ha approvato un piano industriale per costruire dieci centrali da 50 MW nel sud Italia.

Sistemi a cilindri parabolici a concentrazione lineare

Il pannello solare a concentrazione concentra i raggi solari su un opportuno ricevitore; attualmente il tipo più usato è quello a specchi parabolici a struttura lineare che consente un orientamento monodimensionale (più economico) verso il sole e l'utilizzo di un tubo ricevitore in cui è fatto scorrere un fluido termovettore per il successivo accumulo di energia in appositi serbatoi. Il vettore classico è costituito da oli minerali in grado di sopportare alte temperature. Nel 2001 l'ENEA ha avviato lo sviluppo del progetto Archimede, volto all'utilizzo di sali fusi anche negli impianti a specchi parabolici a struttura lineare. Essendo necessaria una temperatura molto più alta di quella consentita dagli oli, si è provveduto a progettare e realizzare tubi ricevitori in grado di sopportare temperature maggiori di 600°C (contro quelle di 400°C massimi dei tubi in commercio), ricoperti di un doppio strato CERMET (ceramica/metallo) depositato con procedimento di sputtering. I sali fusi vengono accumulati in un grande serbatoio coibentato alla temperatura di 550°C. A tale

temperatura è possibile immagazzinare energia per 1kWh equivalente con appena 5 litri di sali fusi. Da tale serbatoio i sali (un comune fertilizzante per agricoltura costituito da un 60% di nitrato di sodio (NaNO_3) e un 40% di nitrato di potassio (KNO_3)) vengono estratti e utilizzati per produrre vapore surriscaldato. I sali utilizzati vengono accumulati in un secondo serbatoio a temperatura più bassa (290°C). Ciò consente la generazione di vapore in modo svincolato dalla captazione dell'energia solare (di notte o con scarsa insolazione). L'impianto, lavorando ad una temperatura di regime di 550°C , consente la produzione di vapore alla stessa temperatura e pressione di quello utilizzato nelle centrali elettriche a ciclo combinato (turbina a gas e riutilizzo dei gas di scarico per produrre vapore), consentendo consistenti riduzioni di costi e sinergie con le stesse. Attualmente è stato realizzato un impianto con tali caratteristiche in Spagna ed è stato siglato un accordo di realizzazione di un impianto su scala industriale presso la centrale termoelettrica ENEL ubicata a Priolo Gargallo (Siracusa).



Problemi e vantaggi

Le centrali solari devono far fronte alla non continua disponibilità della fonte energetica, questa forma di energia è infatti dipendente dalle condizioni atmosferiche come la presenza di nubi o pioggia.

Gli impianti più moderni infatti prevedono di stoccare il fluido ad alta temperatura in appositi serbatoi isolati, che permettono di far funzionare le turbine non solo durante la notte ma con una autonomia di alcuni giorni in caso di cattivo tempo. Questi impianti hanno comunque la possibilità di essere alimentati a gas nel caso le condizioni sfavorevoli perdurino. Queste centrali vengono preferibilmente collocate in luoghi molto assolati (i deserti, la California, la Sicilia, ecc).

Gli specchi solari attuali per funzionare correttamente richiedono di essere esattamente puntati rispetto al Sole e quindi sono presenti sistemi motorizzati che provvedono a far mantenere l'orientamento corretto. Questi sistemi contribuiscono ad elevare il costo dell'energia elettrica prodotta dalla centrale riducendone la convenienza.

Grossi passi in avanti hanno fatto negli ultimi anni gli studi sulla Non imaging Optics "ottica senza ricostruzione dell'immagine" che permettono già ora di costruire concentratori parabolici fissi, (in inglese CPC Compound Parabolic Concentrator) che accettano angoli di ingresso per la radiazione solare anche di 55 gradi.

Gli impianti di ultima generazione, come quello di Priolo in Sicilia (Progetto Archimede), utilizzando dei sali fusi come liquido convettore, riescono a raggiungere temperature di 550 gradi

permettendo l'utilizzo delle stesse tecnologie delle centrali tradizionali e quindi sia la possibilità di essere affiancati ad impianti esistenti, sia una riduzione dei costi grazie all'utilizzo di componenti standard.

Le centrali solari ad alta temperatura progettate in Italia dal premio Nobel Carlo Rubbia rappresentano le fonti da questo tipo di energia con la maggiore convenienza attualmente esistenti, massimo impegno andrebbe posto nel cercare di renderle ulteriormente convenienti (come del resto si sta facendo nel resto del mondo).

Lo spazio occupato da centrali di questo tipo dipende dalla potenza delle stesse, e può quindi risultare piuttosto consistente.

Notevoli sono i lati positivi di questa fonte di energia, non ci sono emissioni inquinanti o di gas serra, non è necessario il trasporto di combustibili, non si producono scorie, la centrale non è pericolosa per gli abitanti nei dintorni, e non si presta a pericolosi attentati terroristici.

Anche il fattore costo, che appare uno svantaggio, se riveduto con quello che è il costo ambientale delle fonti fossili, (inquinamento, effetto serra, frequenza di eventi atmosferici estremi), va riconsiderato e valutato sulla base degli scenari futuri.

2.2 SOLARE A BASSA TEMPERATURA

Si mettono in seguito a confronto diverse modalità impiantistiche che riguardano l'impiego di sistemi solari termici atti a produrre calore a bassa temperatura ($<120^{\circ}\text{C}$).

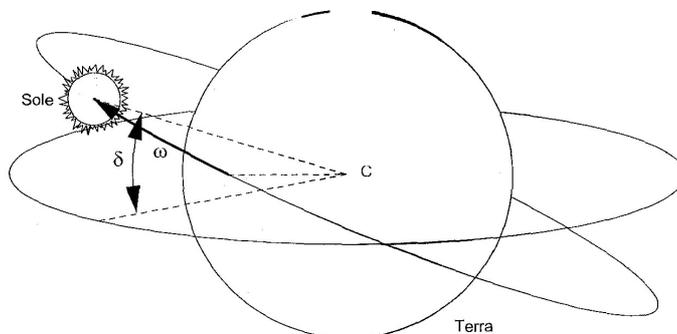
E' diffuso il loro impiego in ambito civile al fine di produrre acqua calda sanitaria (d'ora in poi verrà sintetizzato con ACS) che trova impiego a temperature comprese tra 40 e 60°C e di acqua calda per riscaldamento (d'ora in poi scriveremo ACR) che trova impiego a temperatura dipendente dal terminale scaldante, negli impianti che fanno uso di pannelli radianti (sistema di riscaldamento più consueto ed efficace quando si debba far uso dell'energia solare) la temperatura risulta generalmente prossima a 40°C .

3 LA RADIAZIONE SOLARE UTILE

Per valutare quanto potrà produrre un impianto solare (termico o fotovoltaico che sia) è necessario valutare i parametri che influiscono sulla radiazione solare che va a incidere sul collettore.

Tali parametri sono di due tipi: geometrici/astronomici e meteorologici.

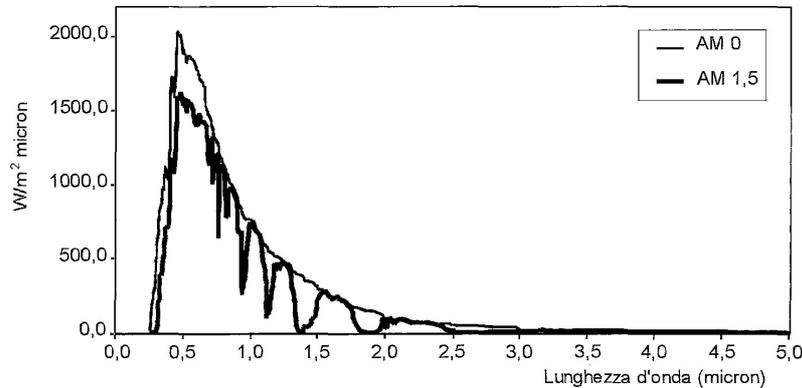
I primi sono dovuti alla rotazione della terra attorno al proprio asse e alla rivoluzione attorno al sole e possono essere determinati in modo esatto per via analitica.



Per valutare i secondi invece, vista la loro aleatorietà, è necessario basarsi su analisi statistiche.

3.1 Fattori geometrici/astronomici.

La radiazione solare si presenta sulla fascia esterna dell'atmosfera terrestre (massa atmosferica AM=0) con una potenza media di 1367 W/m² e una distribuzione spettrale secondo l'andamento riportato in figura.



Sulla superficie terrestre (massa atmosferica media AM=1,5) tale radiazione arriva invece attenuata a causa dell'atmosfera, che assorbe e riflette, tanto da raggiungere valori massimi attorno ai 1000 W/m². Inoltre i raggi solari arrivano al suolo con un'inclinazione, rispetto al piano della superficie, che varia durante le ore del giorno a causa della rotazione terrestre attorno al proprio asse e che dipende anche dal giorno dell'anno a causa dell'orbita che la terra compie attorno al sole e al fatto che l'asse terrestre risulta inclinato rispetto a tale orbita.

Questi due concetti possono essere espressi matematicamente da due angoli:

- l'angolo orario $\omega = 15 (t_s - 12)$
che tiene conto della rotazione giornaliera della terra (t_s è l'ora solare);
- la declinazione $\delta = 23,5 \sin [360 (284 + n) / 365]$
che tiene conto della rivoluzione annuale (n è il numero del giorno dell'anno).

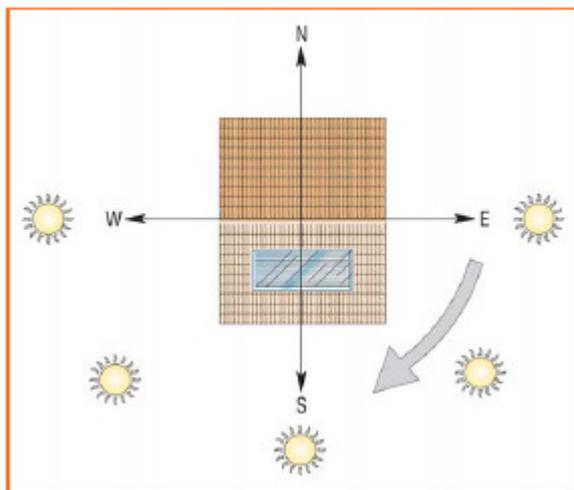
Noti questi angoli, la latitudine del sito in cui si installerà l'impianto, l'inclinazione e l'orientamento dei collettori è possibile calcolare l'angolo di incidenza dei raggi solari sulla loro superficie per ogni ora di ogni giorno dell'anno. In questo modo si possono trovare l'inclinazione e l'orientamento ottimali per massimizzare la captazione di energia da parte dei collettori.

I pannelli solari se non correttamente posizionati in relazioni al miglior irraggiamento possono avere una perdita di efficienza tale da vanificarne la convenienza economica. Questo obbliga il progettista a tenere ben presenti tre parametri fondamentali: l'orientamento, l'angolo di inclinazione e l'ombreggiamento.

3.1.1 Orientamento

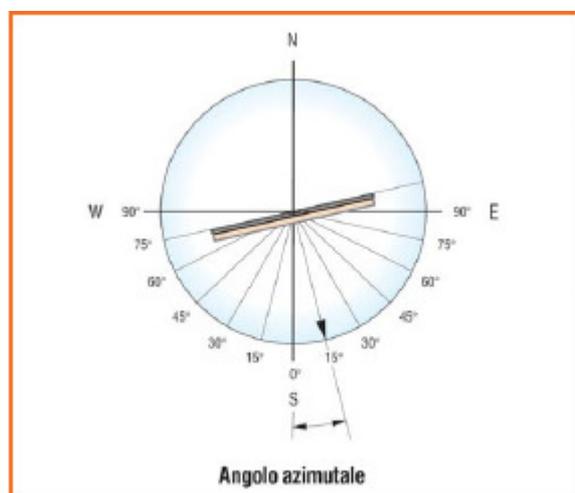
In fase di progettazione di un sistema a collettori solari, sia esso un'installazione singola ed a maggior ragione per sistemi complessi a più batterie, uno dei fattori da considerare maggiormente è l'orientamento dei pannelli.

Considerando solo i fattori astronomici, appare ovvio che l'orientamento ottimale è verso Sud poiché corrisponde alla massima esposizione nell'arco della giornata.

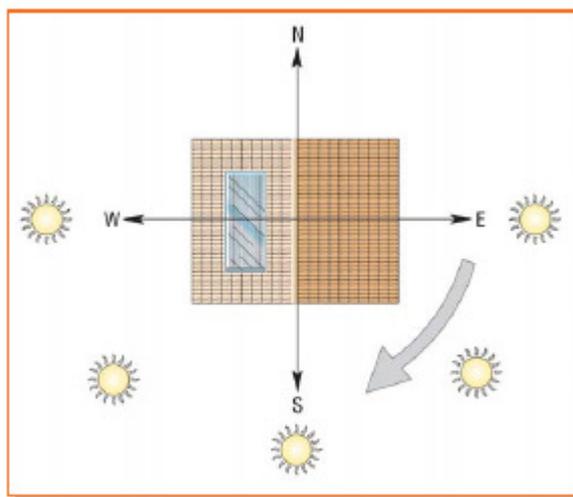


La deviazione dei collettori solari rispetto la perpendicolarità al sud cardinale viene definito “angolo azimutale”:

- Azimut: 0° collettore orientato a Sud
- + 90° collettore orientato a OVEST
- 90° collettore orientato ad EST



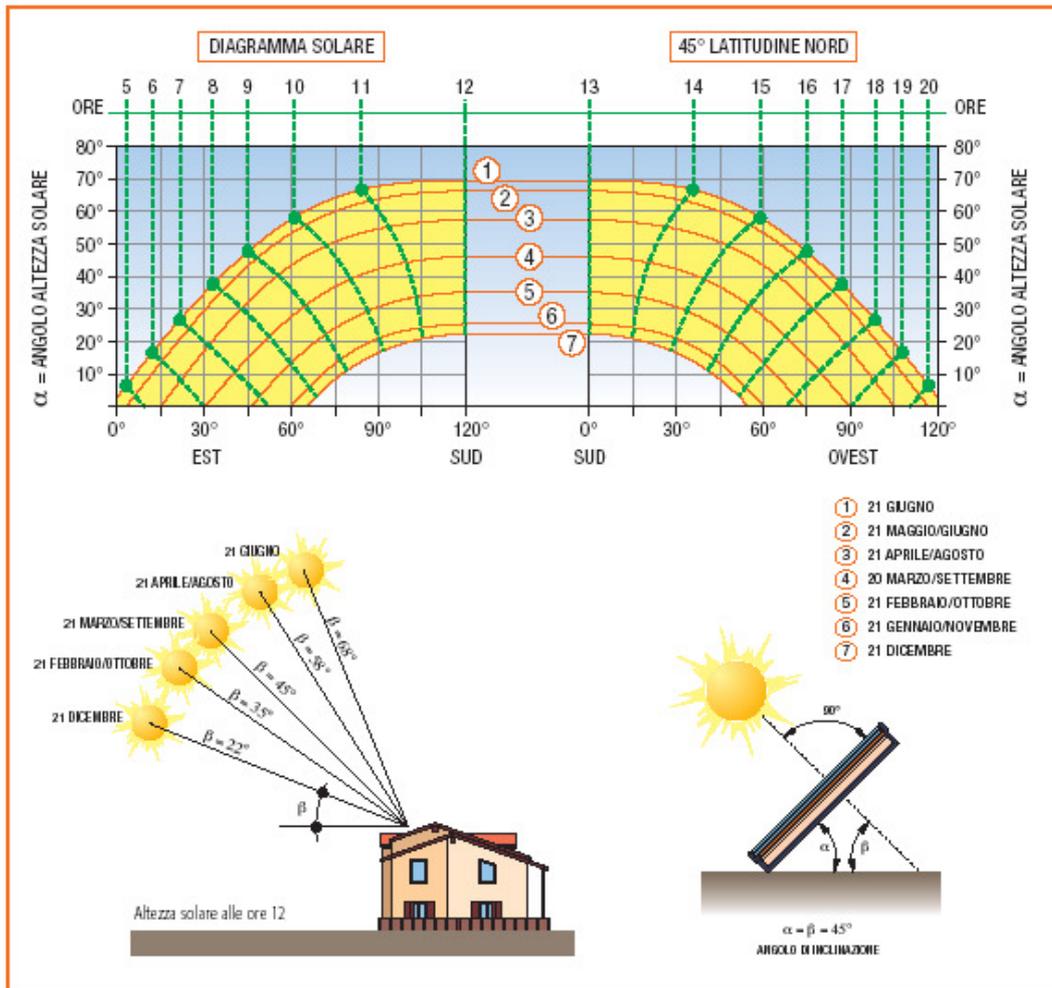
Per tetti con esposizione EST - OVEST si predilige l'installazione dei collettori sulla parte che da ad OVEST poiché sarà più esposta al pomeriggio e quindi meno soggetta alle nebbie o foschie mattutine, saranno presenti temperature dell'aria maggiori e di conseguenza consentirà di raggiungere un rendimento complessivo più alto.



3.1.2 Inclinazione

Per quanto riguarda l'inclinazione ottimale è necessario fare una media tra le condizioni estive e quelle invernali e valutare se l'impianto viene utilizzato lungo tutto l'anno o meno (se l'utilizzo è prettamente estivo si sceglierà un'inclinazione adatta solo per tali condizioni).

Una soluzione di compromesso tra condizioni estive e invernali è l'adozione di un' inclinazione pari alla latitudine del sito di installazione.



Il diagramma e la figura mostrano con chiarezza gli angoli (β) di incidenza al suolo dei raggi solari (e di conseguenza l'inclinazione α dei collettori), durante tutto l'anno.

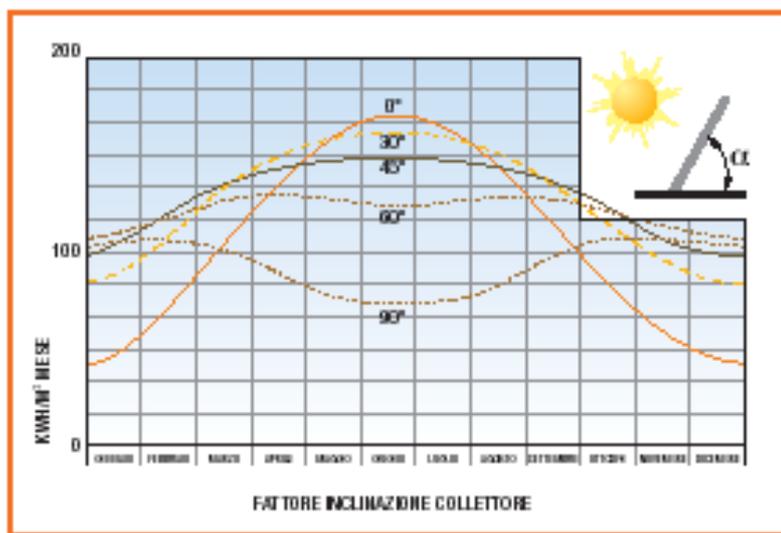


Figura A

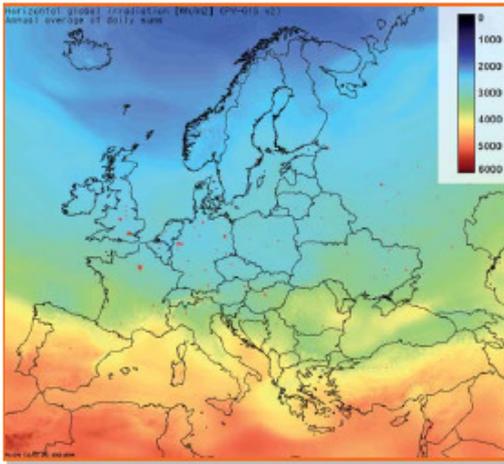
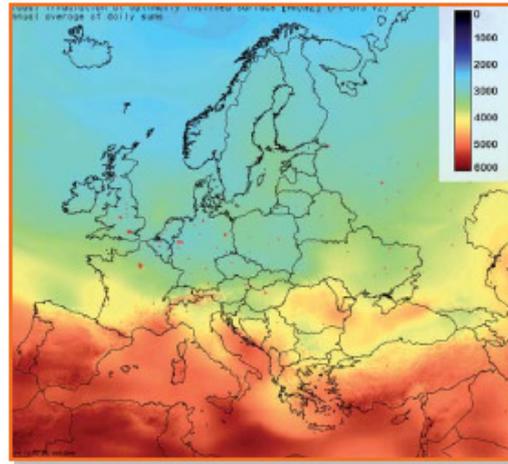
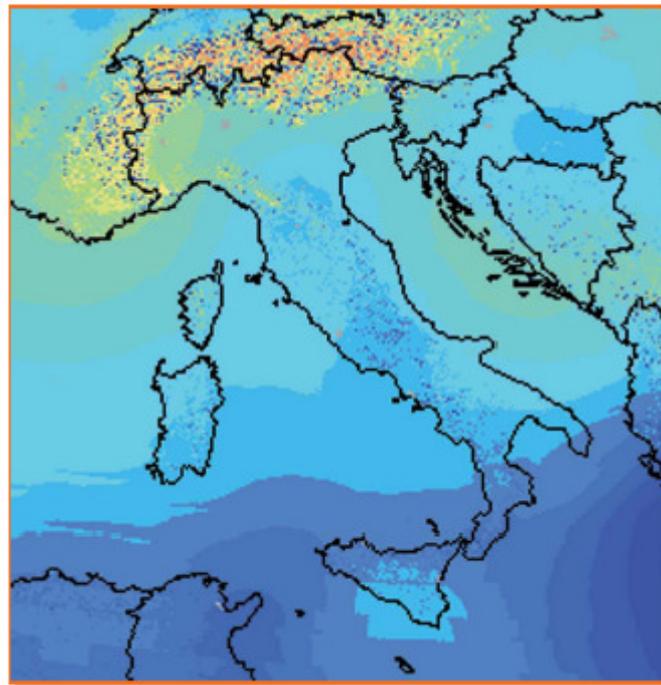


Figura B



Le due mappe ci mostrano come può variare la potenza (in Wh/m^2 giorno) captata dallo stesso collettore solare se installato orizzontale al suolo (fig. A) o se correttamente inclinato (fig. B) in rapporto alla latitudine di riferimento.

Da queste considerazioni, il servizio scientifico della Commissione Europea, ha elaborato una mappa indicante le inclinazioni ideali dei collettori solari al fine di captare la massima energia durante l'arco dell'anno.



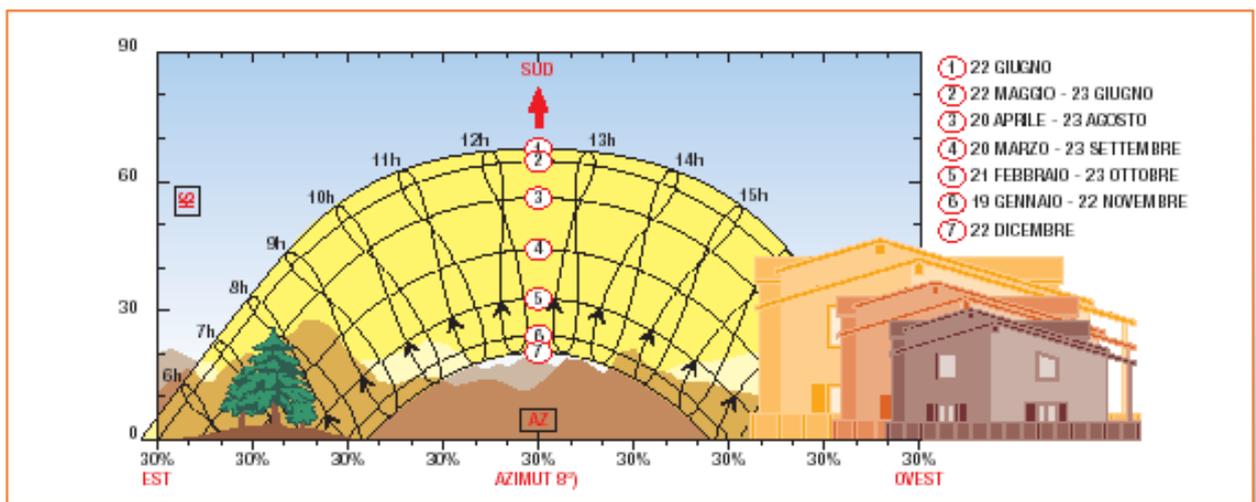
3.1.3 Ombreggiamento

Infine è importante valutare l'influenza che l'ambiente circostante può avere sulla resa dell'impianto, soprattutto a causa di ombreggiamenti.

Fondamentalmente si distinguono due tipi di ombra:

- l'ombra lontana corrispondente alla sparizione del sole dietro la linea d'orizzonte. Si può supporre che a un istante dato, influenzi tutto il campo dei collettori (funzionamento in "tutto o niente");
- l'ombra vicina: gli ostacoli vicini danno un'ombra solo su una parte del campo. Il suo trattamento necessita la ricostruzione geometrica esatta del sistema e delle sue vicinanze in 3 dimensioni.

Utile da questo punto di vista è la creazione di un diagramma delle ombre o clinometrico su cui riportare le traiettorie del sole relative al 21 giugno e 21 dicembre (traiettoria massima e minima del sole sull'orizzonte) e i possibili ostacoli sull'orizzonte.



La curva dell'orizzonte deve essere rilevata sul terreno, misurando l'angolo di elevazione dell'orizzonte per differenti azimut. Queste misure possono essere riportate sul diagramma altezza/azimut come illustrato dalla figura che mostra un esempio di un profilo tipico dell'orizzonte in un ambiente di montagna.

Sui tetti piani o in pieno campo i collettori solari vengono disposti a file. Mentre la prima fila viene di regola irraggiata integralmente, è difficile evitare che le file successive non siano in qualche modo ombreggiate dalle file antistanti quando il sole è basso, ossia la mattina e la sera, come d'inverno.

La distanza minima tra file di collettori, necessaria a prevenire un ombreggiamento reciproco, fermo restando la lunghezza del collettore, dipende dall'inclinazione e dalla zona geografica (latitudine) dell'installazione.

Alle nostre latitudini per evitare l'ombreggiamento, è necessario rispettare le distanze indicate in tabella, che tengono conto dell'altezza del pannello e soprattutto dell'inclinazione solare.

Per la posa delle file di collettori solari ci si può attenere ad un paio di regole empiriche:

- Quanto più le file sono distanziate, minore è la probabilità che si trovino in ombra. Il pericolo di ombreggiamento reciproco non deve essere sottovalutato: di regola è assai più frequente che non l'ombreggiamento determinato dall'orizzonte.
- Per l'angolo di ombreggiamento β , su un piano orizzontale è opportuno non superare il limite massimo di 18° . Se la superficie del tetto a disposizione è limitata, si consiglia di ridurre anzitutto l'angolo di inclinazione α . In questo modo si riduce l'effetto dell'ombreggiamento reciproco.

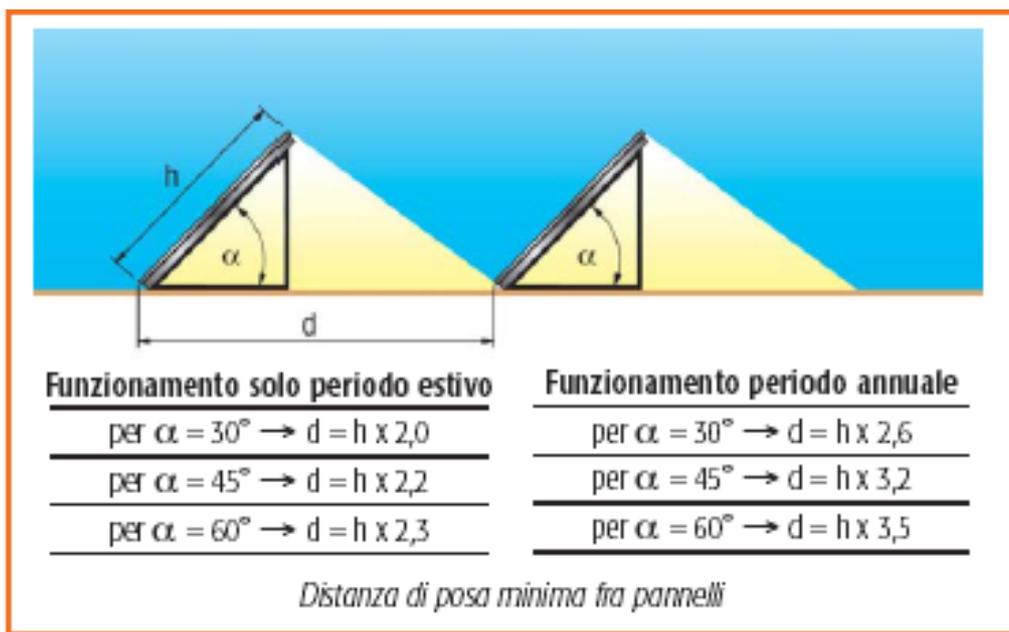
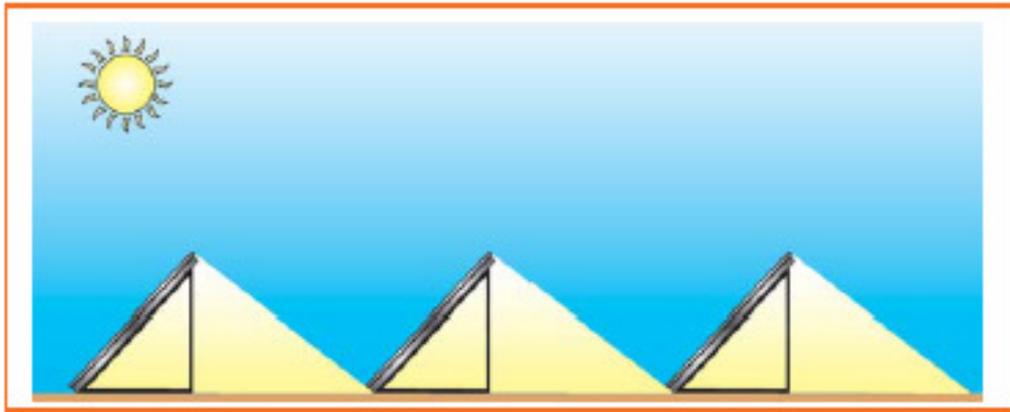


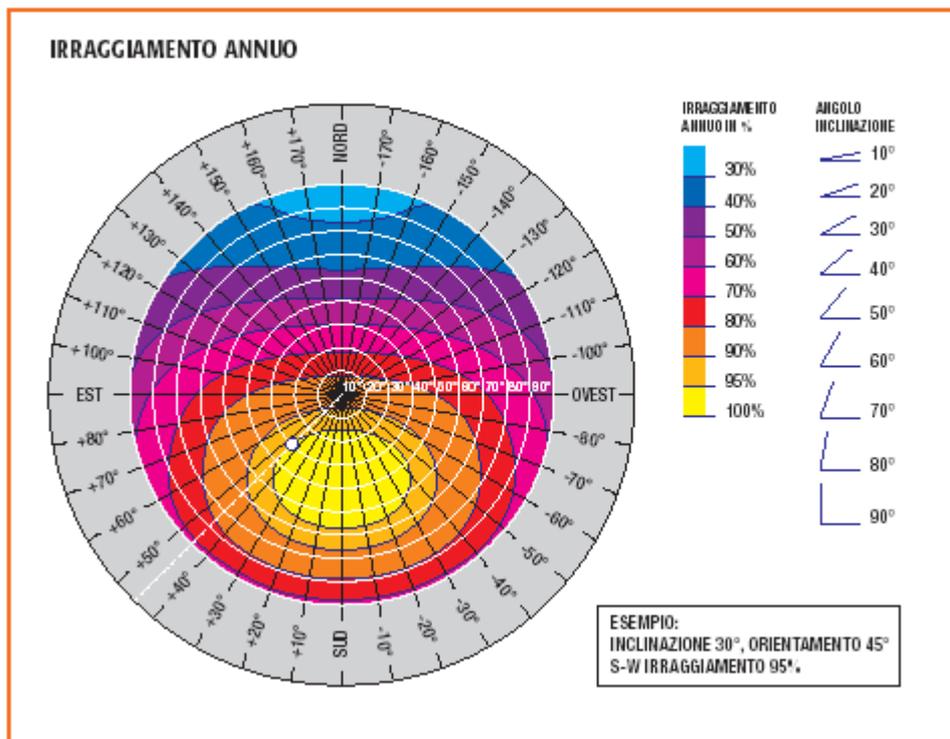
TABELLA DELLE LATITUDINI DELLE CITTÀ ITALIANE

Regione	Città	Latitudine	Longitudine
Friuli Venezia Giulia	Gorizia	45 56	13 37
	Pordenone	45 58	13 37
	Trieste	45 38	13 48
	Udine	46 04	13 14
Veneto	Belluno	46 08	12 13
	Padova	42 25	11 52
	Rovigo	45 04	11 47
	Treviso	45 40	12 15
	Venezia	45 26	12 19
	Verona	45 26	10 59
	Vicenza	45 33	11 33
Trentino Alto Adige	Bolzano	46 30	11 21
	Trento	46 04	11 07
Lombardia	Bergamo	45 42	9 40
	Brescia	45 32	10 14
	Como	45 49	9 05
	Cremona	45 08	10 02
	Lecco	45 51	9 24
	Lodi	45 19	9 30
	Mantova	45 10	10 48
	Milano	45 28	9 10
	Pavia	45 11	9 09
	Sondrio	46 10	9 52
Piemonte	Alessandria	44 55	8 37
	Asti	44 54	8 12
	Biella	45 34	8 04
	Cuneo	44 23	7 33
	Novara	45 27	8 37
	Torino	45 04	7 42
	Verbania	45 56	8 32
	Vercelli	45 19	8 25
Valle D'Aosta	Aosta	45 44	7 19
Liguria	Genova	44 25	8 56
	Imperia	48 53	8 02
	La Spezia	44 06	9 46
	Savona	44 18	8 29
Emilia Romagna	Bologna	44 30	11 21
	Ferrara	44 50	11 37
	Forlì	44 14	12 03
	Modena	44 39	10 56
	Parma	44 48	10 20
	Piacenza	45 03	9 42
	Ravenna	44 25	12 12
	Reggio nell' Emilia	44 42	10 38
	Rimini	44 03	12 34
	Toscana	Arezzo	43 28
Firenze		43 47	11 15
Grosseto		42 46	11 06
Livorno		43 33	10 19
Lucca		43 51	10 31
Massa Carrara		44 02	10 08

Regione	Città	Latitudine	Longitudine
Toscana	Pisa	43 43	10 24
	Pistoia	43 56	10 55
	Prato	43 53	11 06
	Siena	43 20	11 20
Marche	Ancona	43 37	13 31
	Ascoli Piceno	42 51	13 35
	Macerata	43 18	13 27
	Pesaro	43 55	12 54
Umbria	Perugia	43 07	11 23
	Termi	42 34	11 39
Lazio	Frosinone	41 54	12 30
	Latina	41 28	12 54
	Rieti	42 24	12 52
	Roma	41 54	12 30
	Viterbo	42 25	12 06
	Abruzzo	L'Aquila	42 21
Chieti		42 21	14 10
Pescara		42 28	14 13
Teramo		42 39	13 42
Molise	Campobasso	41 34	14 40
	Isernia	41 36	14 14
Campania	Avellino	40 55	14 47
	Benevento	41 08	14 47
	Caserta	41 04	14 20
	Napoli	40 50	14 15
Puglia	Salerno	40 41	14 45
	Bari	41 08	16 52
	Brindisi	40 38	17 56
	Foggia	41 28	15 33
	Lecce	40 21	18 10
Basilicata	Taranto	40 28	17 14
	Matera	40 40	16 36
	Potenza	40 38	15 48
Calabria	Catanzaro	38 54	16 36
	Cosenza	38 18	16 15
	Crotone	39 05	17 05
	Reggio Calabria	38 07	15 39
	Vibo Valentia	38 40	16 05
	Sicilia	Agrigento	37 19
Caltanissetta		37 29	14 04
Catania		37 31	15 04
Enna		37 34	14 16
Messina		38 11	15 33
Palermo		38 07	13 22
Ragusa		36 56	14 45
Siracusa		37 05	15 17
Trapani		38 01	12 31
Sardegna		Cagliari	39 13
	Nuoro	40 19	9 20
	Oristano	39 54	8 35
	Sassari	40 44	8 33

Risulta utile a questo punto fare alcune considerazioni relativamente al corretto posizionamento dei collettori relativamente ai fattori di orientamento ed inclinazione.

Il diagramma indicato successivamente, denominato “Modello Perez”, analizza i due fattori di cui sopra, ovvero orientamento ed inclinazione, interpolandoli in una situazione specifica. L’esempio qui analizzato è relativo ad un impianto per la produzione domestica di acqua calda sanitaria collocato ad una latitudine di 50° Nord.



Per questo tipo di impianto, la resa ottimale (100%) è con un orientamento a Sud (tendente leggermente a Ovest +10°) ed un'inclinazione pari 50° (α) rispetto al piano orizzontale.

Il grafico e l'esempio specifico ci forniscono comunque alcune indicazioni importanti.

Possiamo rilevare infatti che con un orientamento dei pannelli da 20° Sud/Est a 40° Sud/Ovest, l'efficienza del pannello cala di solo il 5% come anche modificando l'inclinazione del pannello, da 30° a 60°, non abbiamo una modifica rilevante della resa che comprometta la potenza fornita dal pannello. Considerando il modestissimo calo di rendimento che si verifica a fronte di larghe tolleranze nel posizionamento dei pannelli (- 5%), possiamo affermare, in linea di massima, che grandi investimenti per inseguire l'installazione perfetta (inclinazione/orientamento), spesso non vengono ripagati con altrettanta efficienza.

3.2 Fattori meteorologici

Per quanto riguarda i fattori meteorologici bisogna affidarsi a valutazioni di tipo statistico. E' soprattutto importante conoscere la temperatura media dell'aria giornaliera e annuale per il sito in esame e la nuvolosità, che va ad influenzare la radiazione.

Per quanto riguarda la radiazione è importante distinguere tra componente diretta e diffusa, che insieme vanno a costituire la radiazione globale.

Per componente diretta si intende quella dovuta ai raggi che vanno ad incidere direttamente sulla superficie captante dei collettori e che quindi dipende esclusivamente dall'orientamento e dall'inclinazione di questi e dalla posizione del sole sull'orizzonte.

La componente diffusa è invece dovuta all'azione dell'atmosfera e delle nubi che provocano una diffusione della radiazione incidente su tutta la volta celeste. Di conseguenza tale radiazione ha carattere isotropo e può essere captata in qualsiasi direzione della volta celeste.

Tale componente va a costituire la totalità della radiazione globale in giornate di cielo coperto mentre costituisce al massimo un 15% in giornate di cielo sereno.

I collettori solari termici risentono quasi esclusivamente della radiazione diretta e quindi è molto importante avere dati sulla nuvolosità del sito, ovvero sulla radiazione media incidente che si può avere nella località nell'arco dell'anno.

Per valutare quest'ultima si possono utilizzare raccolte statistiche. Tra le più attendibili si ricordano:

- La norma UNI 10349: riporta i dati standardizzati di radiazione solare per i 101 capoluoghi di provincia italiani. In particolare sono riportate le medie giornaliere mensili di radiazione diretta e diffusa.
- Le pubblicazioni biennali dell'ISTAT "Statistiche Ambientali": in questi volumi si trova un capitolo che riporta dati di radiazione solare globale per alcune località monitorate dall'ENAV.
- L'Atlante Solare Europeo: in esso sono riportate le mappe di radiazione solare globale orizzontale media annua (mappe isoradiative). Tali mappe hanno una scala nell'ordine dei 50 o 100 km e non tengono conto dei microclimi locali. Sull'Atlante si riscontrano in media valori inferiori del 5-15% rispetto a quelli riportati sulla UNI 10349.
- Le mappe solari satellitari: dai satelliti meteorologici è possibile stimare il grado di nuvolosità di un dato territorio e costruire così delle mappe. Unendo poi questi dati con quelli di radiazione solare media misurati al suolo è possibile ricostruire mappe statistiche di radiazione solare. Queste mappe possono avere risoluzioni anche di 10-15 km con un miglioramento rispetto alle mappe ricavate dai soli dati al suolo. (tra queste si ricorda quella che l'ENEA sta producendo dal 1994 utilizzando le immagini Meteosat).

Nel caso non si avessero dati distinti di radiazione diretta e diffusa, è possibile fare un modello dell'atmosfera conoscendo la radiazione globale rilevata al suolo e la radiazione incidente extratmosferica. Con tale modello è possibile poi stabilire un andamento delle componenti diretta e diffusa durante la giornata.

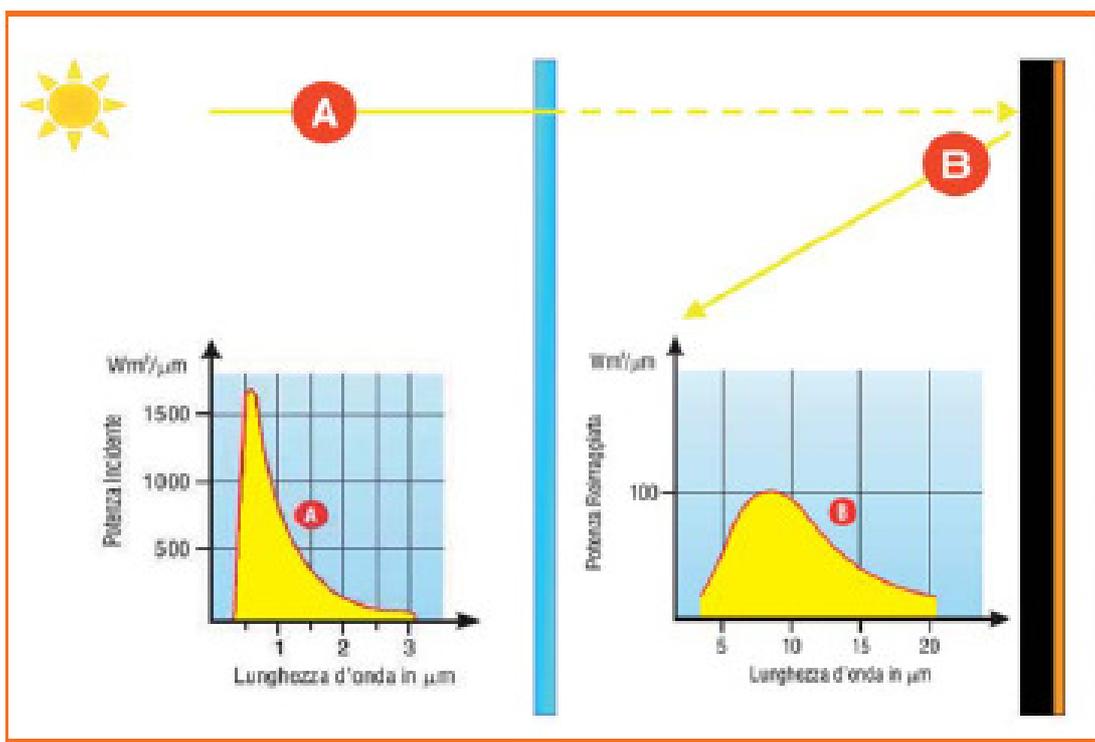
E' importante conoscere anche l'andamento della temperatura in una determinata località, in quanto anch'essa influenza la resa dei pannelli solari. Dati sulla temperatura media mensile per varie località sono riportati nella sopraccitata norma UNI 10349.

Per effettuare un calcolo raffinato sarebbe opportuno conoscere anche la velocità del vento e la sua possibile influenza sulla temperatura dei pannelli. Dati in merito sono difficilmente reperibili.

4 IL PANNELLO SOLARE

4.1 L'effetto serra

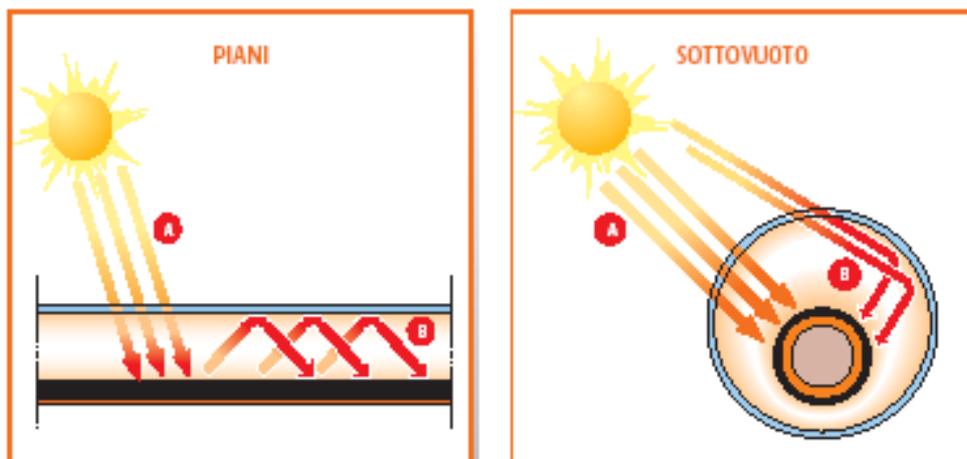
I collettori solari si basano sul principio dell'effetto serra che si produce attraverso un elemento captatore in grado di assorbire la maggior quantità di energia solare ed una copertura trasparente in grado di contenerne l'effetto di re-irraggiamento. L'energia solare, infatti, arriva alla piastra assorbente attraverso il vetro posto sopra di essa con una radiazione di lunghezza d'onda inferiore ai $3\ \mu\text{m}$ e viene in parte assorbita ed in parte riflessa, attraverso radiazioni con una lunghezza d'onda superiori.



La **curva A** rappresenta la lunghezza d'onda della radiazione incidente sul captatore al variare della sua potenza.

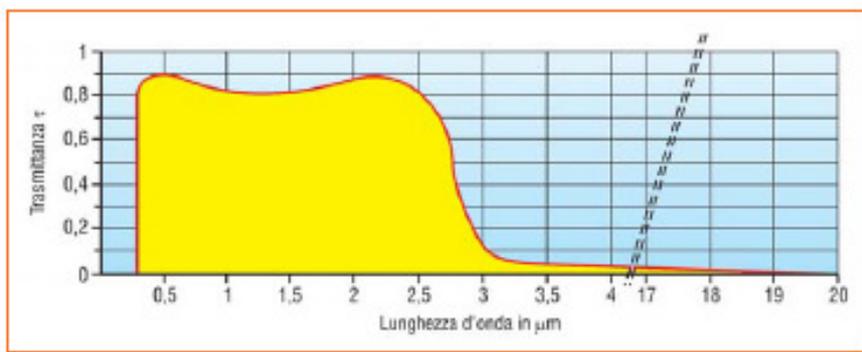
La **curva B** rappresenta la lunghezza d'onda delle radiazioni riflesse dalla superficie captante.

Principio di captazione nei pannelli:



La superficie assorbente, trovandosi ad una temperatura nettamente inferiore a quella del sole, emette radiazioni di lunghezza d'onda nettamente superiori che si collocano nella zona dell'infrarosso termico. La copertura del pannello risulta opaca a queste lunghezze d'onda, che pertanto non riescono ad attraversarla, rimanendo imprigionate all'interno del sistema aumentandone sensibilmente la temperatura favorendo in tal modo l'utilizzo dell'energia radiante.

Il diagramma sotto riportato indica, appunto, questa caratteristica di una copertura in vetro. La trasmittanza (t), ovvero la capacità del vetro di essere trasparente alle radiazioni solari, è massima fino a valori d'onda di 2.5 - 3 micron, mentre per valori superiori diventa praticamente opaco, impedendo alla radiazione di attraversarlo.



Se ne deduce che un buon collettore solare dovrà essere caratterizzato da un sistema di captazione ad elevato assorbimento e bassa emissività, e di un sistema di copertura il più possibile trasparente alle radiazioni con lunghezza d'onde inferiori ai 3 μm ed opaco per onde di lunghezza superiore.

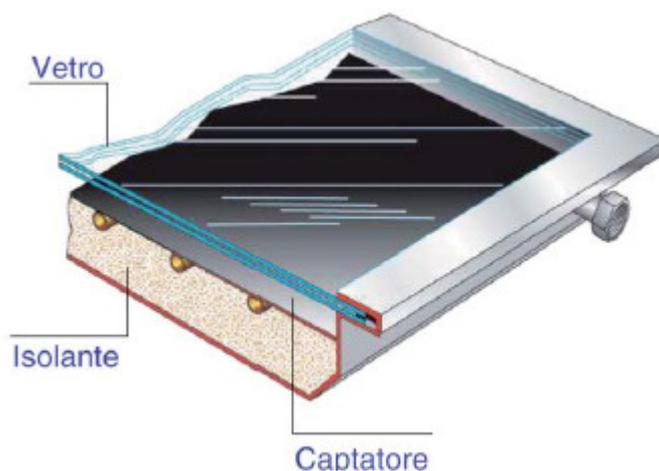
L'efficienza di un pannello solare è il rapporto tra l'energia termica utile e quella solare incidente. Essa dipende dalle caratteristiche dell'elemento captante, la qualità della copertura e la capacità dell'isolante di limitare le perdite per conduzione e convezione.

Il mercato offre oggi diverse tipologie di pannelli solari, ma la quasi totalità delle installazioni è realizzata con due tipologie di collettori: piano e a tubi sottovuoto.

4.2 Il collettore solare piano

Alcune definizioni per collettori piani:

- La superficie della piastra assorbente viene definita superficie Assorbente
- La parte vetrata e trasparente del pannello si chiama superficie Aperta
- L'ingombro totale del pannello solare è la superficie Lorda.



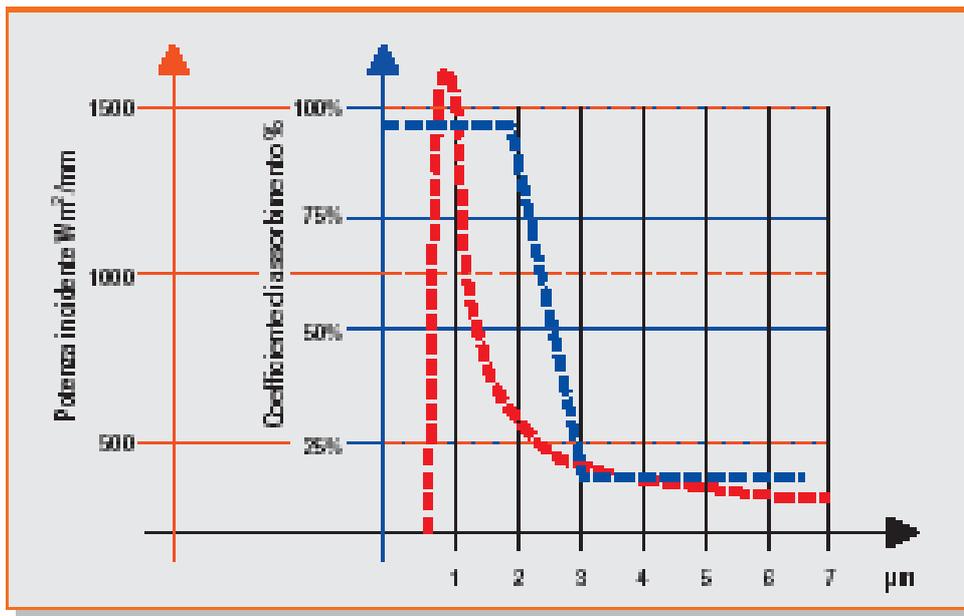
4.2.1 La superficie captante

È composta da una piastra di rame, sulla quale sono saldati i tubi in rame, a loro volta collegati ai collettori di mandata e ritorno del fluido termovettore.

La piastra captante così composta viene trattata con vernici selettive di colore nero opaco o processi di ossidazione chimica per ottimizzarne la capacità assorbente della radiazione solare.

La bontà di un captatore per collettori solari è tanto maggiore quanto più è alto il valore di assorbimento al di sotto della soglia dei 3 μm , di lunghezza d'onda della radiazione.

In linea generale, l'efficienza di un assorbitore è caratterizzata da un'alta capacità di assorbimento delle radiazioni solari e da una bassa emissività delle radiazioni termiche.



ELEMENTO CAPTANTE	COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO
Rame non trattato	5%
Verniciatura nera	15%
Trattamento a cromo	85%
Trattamento agli ossidi di Titanio	95%

Ad oggi si hanno le massime prestazioni con trattamenti selettivi della piastra agli ossidi di Titanio.

Per ottenere che il trasferimento di calore dall'assorbitore al fluido termovettore avvenga in maniera efficiente e uniforme, le tubazioni dell'assorbitore non devono essere troppo distanziate l'una dall'altra. Il materiale con il quale è fatto l'assorbitore deve avere una buona conduttività termica e non deve essere troppo sottile, in genere si usano lamiere di rame o di alluminio dello spessore di 0,2 mm.

Varie possono essere le tipologie costruttive tra le quali:

a serpentino:

Questo tipo di assorbitori sono costruiti con unico tubo a formare un serpentino che percorre l'intera superficie captante nel quale scorre il fluido termovettore. La sua diffusione è stata frenata dalle elevate perdite di carico specifiche dovute a difficoltà costruttive, oggi però rivalutato in impianti a bassa portata o potenza e per la sua semplicità idraulica.

a tubi paralleli:

La tipologia costruttiva di questo tipo di assorbitore consiste in diversi tubi paralleli alettati (di mandata e ritorno) disposti a forma di “arpa” circuitati, a seconda della tipologia, in parallelo o in serie. Caratterizzato da basse perdite di carico, così da essere usato anche per impianti a circolazione naturale, ha raggiunto una buona quota di mercato nonostante il maggior impegno costruttivo.

a superficie:

La tipologia costruttiva di questo tipo di assorbitore consiste in un numero elevato di tubi di diametro ridotto che attraversano l'intero pannello a minima distanza l'uno dall'altro tra due lamiere di acciaio inox saldate a pressione o a laser (da qui assorbitori a piastra) secondo il metodo “large-area joining”. Con questo tipo di collettore è possibile raggiungere gradi di efficienza molto elevati. La resistenza alla pressione è limitata dalla resistenza della connessione che è generalmente di 300 kPa (3 bar).

4.2.2 Il vetro di copertura:

È posto al di sopra del sistema captante, ha funzioni di protezione del sistema contro gli agenti naturali e di innalzamento dell'efficienza del sistema. La lastra ha uno spessore di 3 o 4 mm per resistere alla grandine e viene fissato al telaio con delle guarnizioni resistenti alle radiazioni solari che garantiscono l'impermeabilità del pannello e consentono di compensare le dilatazioni termiche. Il vetro riduce inoltre le dispersioni per convezione, cioè impedisce alle correnti d'aria di lambire direttamente la piastra assorbente e sottrarre calore con conseguente calo della prestazione energetica.

Come precedentemente spiegato la lastra di vetro crea l'effetto serra limitando al massimo le perdite per re-irraggiamento della piastra captante. Per ottimizzare tale fenomeno si usano dei vetri antiriflesso altamente trasparenti per onde da 1 a 3 μm ed opachi per lunghezze superiori.

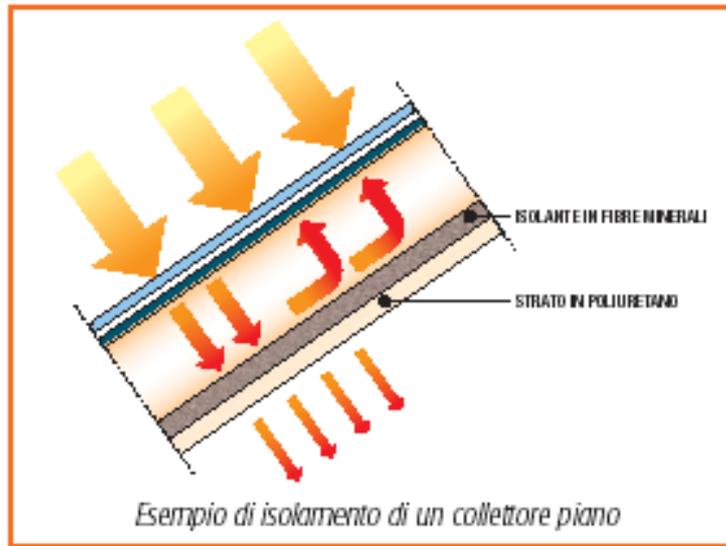
COMPARAZIONE PRESTAZIONI

VETRO STANDARD		VETRO ANTIRIFLESSO	
Assorbimento	1%	Assorbimento	1%
Riflessione superiore	4%	Riflessione superiore	1,5%
Riflessione inferiore	4%	Riflessione inferiore	1,5%
Trasmissione	91%	Trasmissione	96%

4.2.3 L'isolante

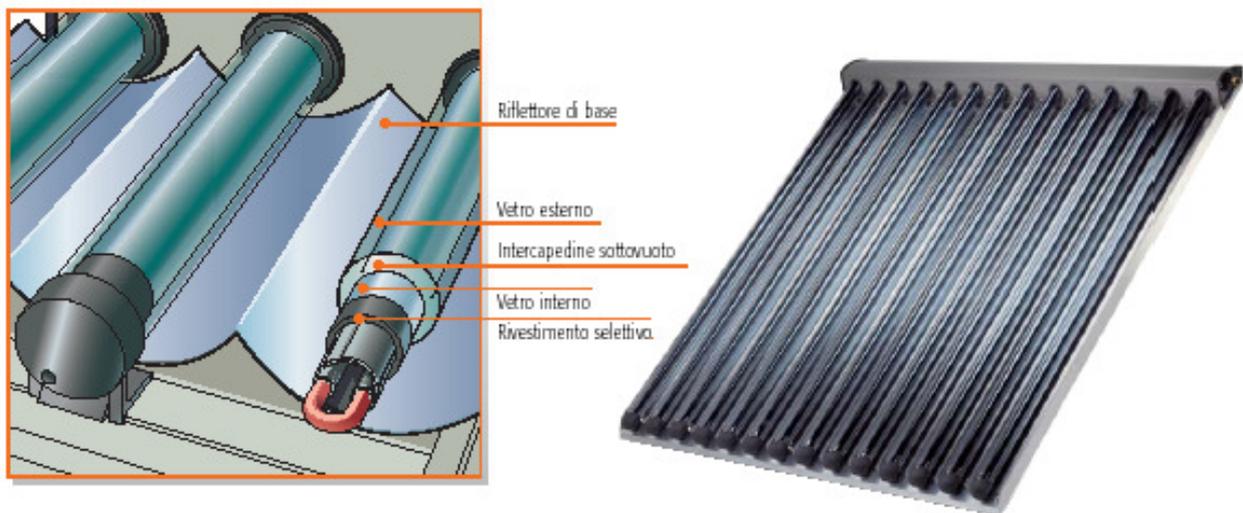
Nei collettori piani, al di sotto dell'assorbitore, viene posto del materiale ad alto grado di isolamento termico al fine di ridurre al minimo le perdite dalla parte posteriore del pannello.

Poiché le temperature del captatore, a stagnazione, possono raggiungere i 200°C si prediligono isolamenti in fibre minerali (lana di roccia) che garantiscono un'ottima prestazione e sopportano agevolmente le alte temperature. I pannelli di qualità superiore sono oggi isolati in due strati, il primo a contatto con la piastra captante in fibra minerale, il secondo, potendo operare a temperatura già ridotta, in poliuretano, avendo questa conducibilità termica inferiore rispetto alla fibra minerale e pertanto assicurando un miglioramento dell'isolamento termico.



4.3 Il collettore solare a tubi evaquati

La tecnologia costruttiva dei pannelli solari sottovuoto è più sofisticata di quelli piani ma è in grado di fornire prestazioni assai elevate.



4.3.1 La superficie captante

Il principio di captazione dei collettori sottovuoto è analogo a quello dei collettori piani. La differenza tra i due sistemi è che l'assorbitore del collettore sottovuoto è costituito da un tubo di vetro la cui superficie è coperta da un trattamento selettivo.

La captazione solare è affidata ad un sistema composto da una batteria di tubi coassiali di vetro borosilicato, chiusi a formare una camera nella quale viene realizzato il vuoto ed inserito l'elemento costituito dai condotti che convogliano il fluido termovettore, con eccellenti caratteristiche di assorbimento e di minima riflessione di calore.

La forma poi cilindrica dell'assorbitore consente una maggiore esposizione al sole, al variare delle condizioni di irraggiamento. Al fine di migliorare le prestazioni del sistema viene posto sotto l'assorbitore un riflettore di forma parabolica in grado di catturare e convogliare l'irradiazione riflessa, sull'elemento captante.

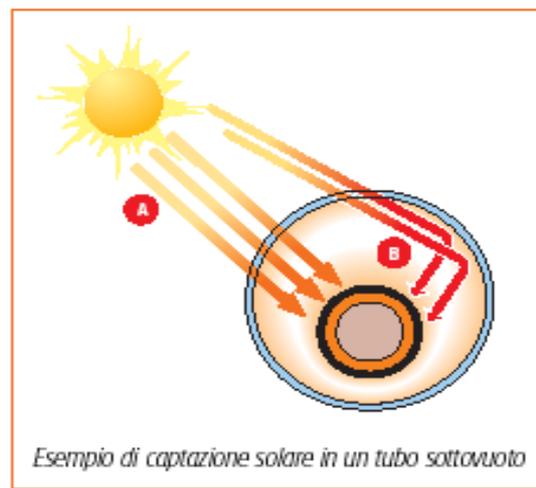
4.3.2 L'isolante

Per i collettori sottovuoto l'isolamento è dato dalla camera sottovuoto creata tra i due vetri che compongono il tubo e ad oggi rappresenta uno dei sistemi più efficaci.

Il sistema così composto migliora il rendimento del collettore. L'effetto isolante della camera sottovuoto riduce al minimo le perdite di calore verso l'ambiente.

Il vuoto attorno all'assorbitore è di importanza decisiva per l'interruzione del meccanismo di trasmissione del calore (convezione e conduzione).

I pannelli solari sottovuoto hanno un elevato rendimento durante tutto l'arco dell'anno e si addicono particolarmente alle installazioni nelle zone ad insolazione medio-bassa, o in zone con condizioni climatiche rigide.



5 CARATTERIZZAZIONE DELLE PRESTAZIONI

5.1 Efficienza

L'efficienza di un pannello solare non è una costante ma per un dato collettore dipende dalle condizioni in cui si trova ad operare, quali: la temperatura di esercizio del pannello, la temperatura ambiente e dall'intensità della radiazione solare incidente sul collettore.

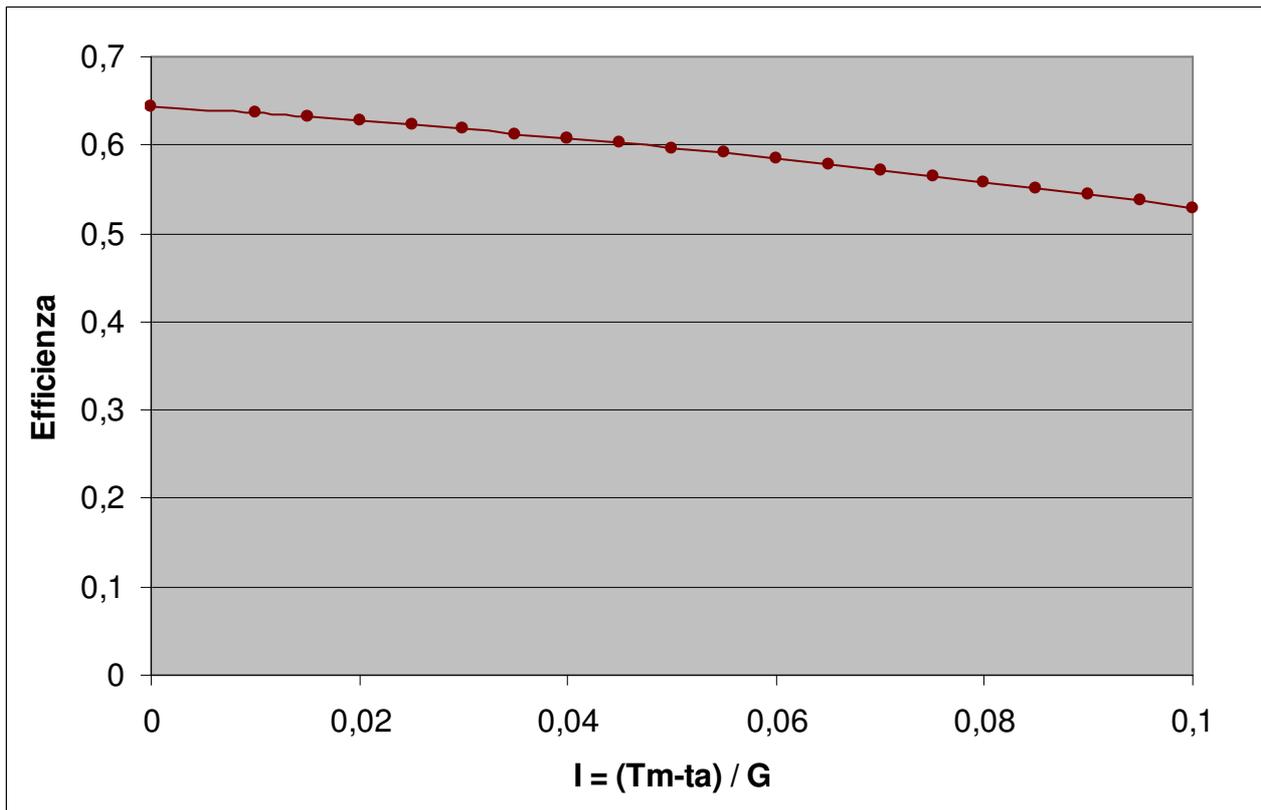
Il rendimento di un pannello solare è rappresentato da una curva che, a parità di radiazione solare incidente, tenderà a diminuire all'aumentare della differenza di temperatura tra il collettore e l'ambiente ed al conseguente aumento delle perdite.

L'espressione dell'efficienza di un collettore solare è data da una relazione del tipo:

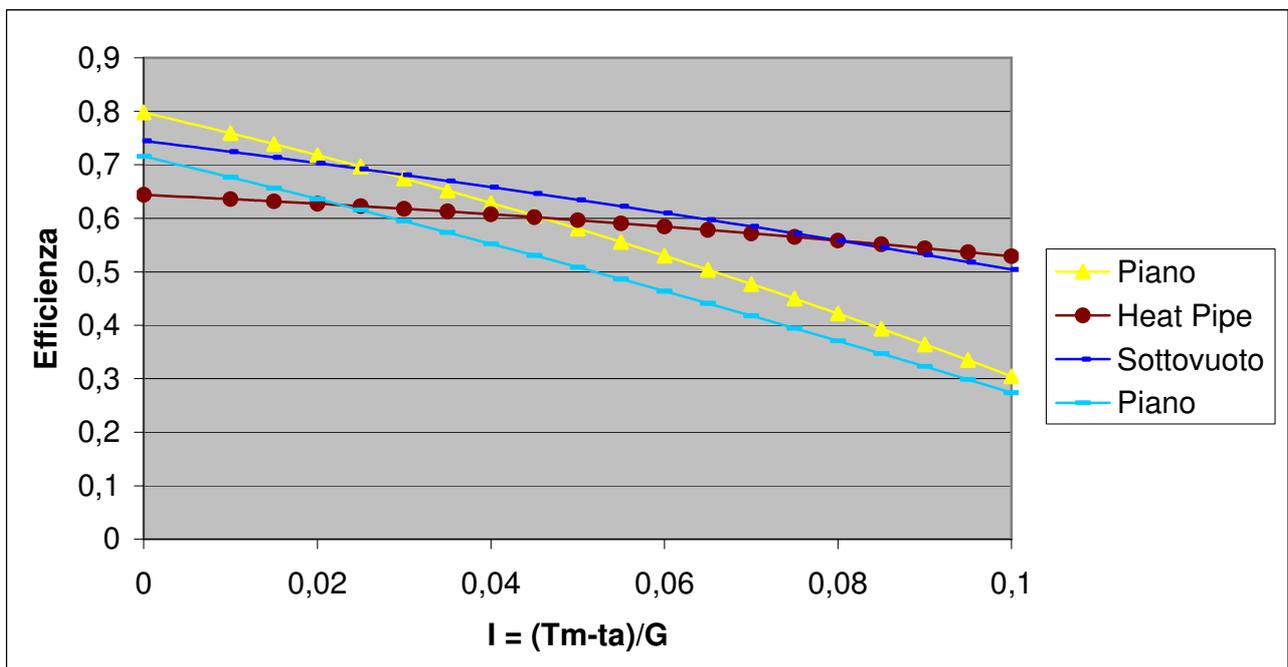
$$\eta = \eta_0 - k_1 \frac{\Delta T}{G} - k_2 \frac{\Delta T^2}{G}$$

Dove G [W/m^2] è la radiazione solare che giunge sul piano del collettore, ΔT è la differenza di temperatura tra la temperatura media del pannello $(T_i + T_u) / 2$, calcolata come media tra la temperatura di ingresso T_i e quella di uscita T_u , e la temperatura ambiente esterna, mentre η_0 , k_1 e k_2 sono delle costanti caratteristiche del pannello che devono essere determinate sperimentalmente e devono essere fornite dalla ditta costruttrice del pannello stesso che deve farne certificare le prestazioni da un laboratorio qualificato.

Il termine $\Delta T/G$ viene generalmente indicato con I e la curva di efficienza di un collettore viene appunto tracciata in funzione di I .



Il confronto delle curve di efficienza di vari pannelli solari permette di evidenziare le diverse prestazioni che offrono differenti tipologie di collettori, come appare nella figura sottostante.



Dal confronto appare che nelle condizioni operative più favorevoli (elevato irraggiamento e piccola differenza di temperatura pannello-ambiente) i collettori piani presentano efficienza superiore alle restanti tipologie per poi decadere rapidamente al peggiorare delle condizioni operative in cui sono favoriti i collettori a tubi evacuati e poi i collettori ad heat-pipe.

5.2 Coefficiente di copertura solare

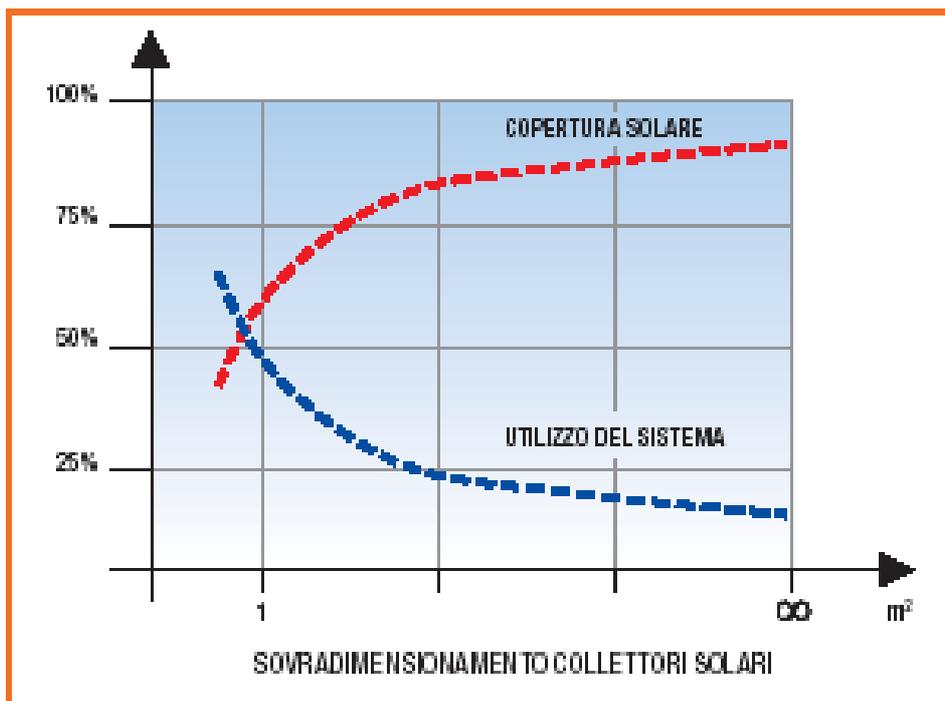
Se consideriamo 100 l'energia necessaria ad un impianto termico il coefficiente di copertura è la percentuale di energia che risulta fornita dai collettori solari.



5.3 Coefficiente di utilizzo dell'impianto

Indica il rapporto tra l'energia totale utile fornita e quella captata dal sistema dei collettori solari. Tale coefficiente fornisce indicazioni sulla qualità dell'impianto ma soprattutto sulle scelte di dimensionamento effettuate.

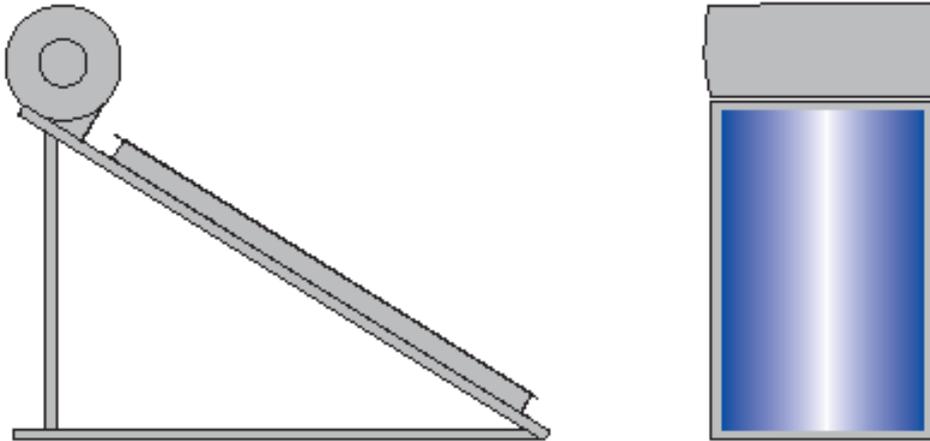
Impianti sovradimensionati, ad esempio per soddisfare le esigenze dell'utenza nei mesi più freddi, sono caratterizzati da elevati gradi di copertura e coefficienti di utilizzo ridotti trovandosi spesso in situazione di stagnazione durante l'estate.



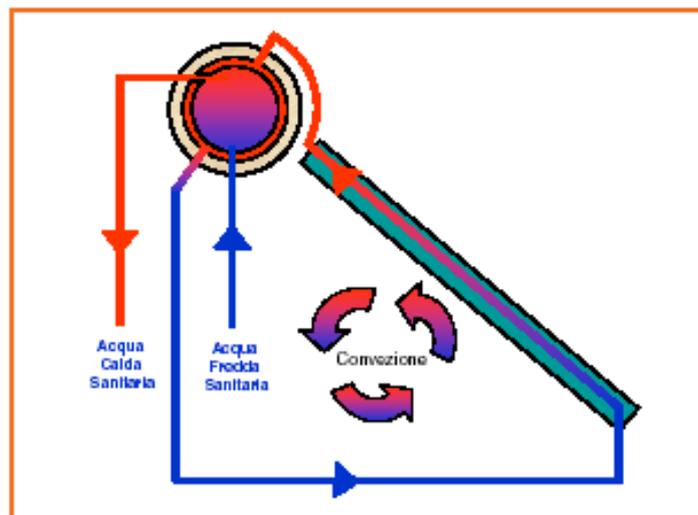
6 TIPOLOGIE DI IMPIANTI SOLARI

6.1 Sistemi a circolazione naturale

I pannelli solari a circolazione naturale, sono sistemi completi in grado di fornire acqua calda ad uso sanitario senza dover essere integrati con apparecchiature supplementari. Il principio di funzionamento è basato sulla convezione del fluido riscaldato che tende a diminuire la propria densità e quindi ad innescare un moto convettivo dal basso verso l'alto. Per garantire la funzionalità del sistema è ovvio che il serbatoio dell'acqua calda sanitaria dovrà essere posizionato all'estremità superiore del pannello.



I sistemi a circolazione naturale risultano più economici sia nei costi di realizzazione che nei costi di gestione in quanto non esiste consumo elettrico dovuto alla pompa e non richiedono sistemi elettronici di controllo; tuttavia l'esigenza di porre il serbatoio ad un'altezza maggiore di quella dei pannelli comporta maggiori costi per la realizzazione di adeguate strutture di sostegno.



La circolazione naturale, rispetto a quella forzata, realizza uno scambio termico meno efficace che determina un minor rendimento complessivo. Inoltre, essendo il serbatoio posto all'esterno, per quanto coibentato, è causa di dissipazione termica del calore raccolto, per cui, cessata l'azione del sole, il contenuto si raffredda molto prima che negli impianti a circolazione forzata nei quali il serbatoio è all'interno dell'edificio.

Un impianto a circolazione naturale è quindi adatto a situazioni nelle quali vi è un uso prevalentemente estivo o in climi caldi e soleggiati.

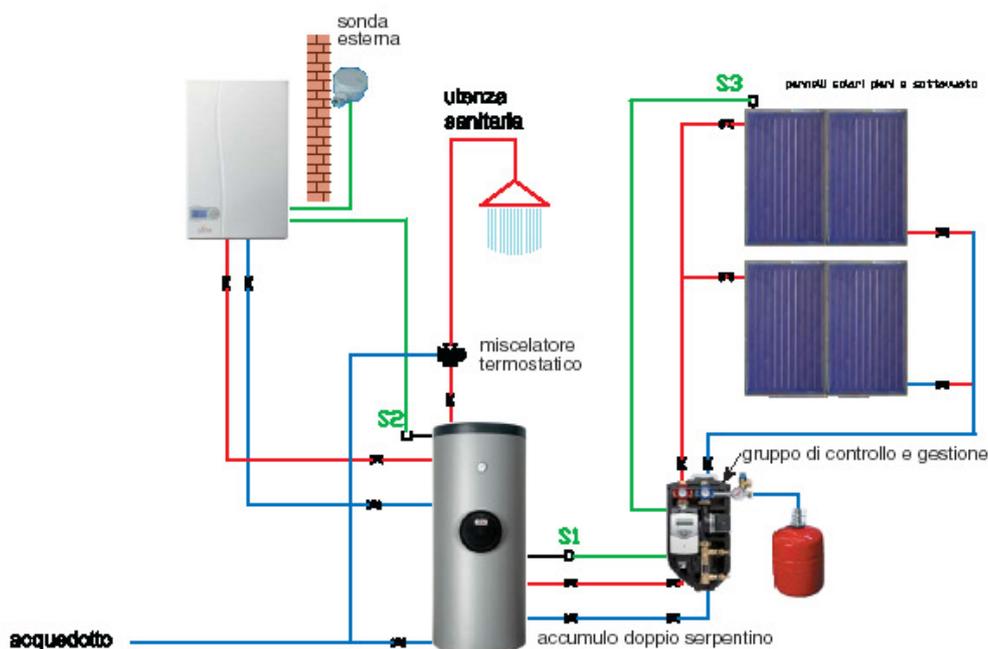
6.2 Sistemi a circolazione forzata

Negli impianti a circolazione forzata, il trasferimento di calore dal collettore al sistema di accumulo è garantito da elettropompe di circolazione e da un sistema di regolazione elettronico per la gestione delle portate e delle temperature del fluido termovettore. Per regolare la circolazione ci si avvale di sensori che confrontano la temperatura del fluido vettore nel collettore con quella nel serbatoio di accumulo, al fine di evitare un processo opposto per il quale il calore viene sottratto all'utente e dissipato dal pannello solare.

In tali impianti la possibilità di regolare la velocità del fluido vettore secondo i parametri di progetto, permette un maggiore scambio termico e quindi il rendimento del pannello è sicuramente superiore rispetto ad un sistema a circolazione naturale. Per questo motivo i collettori a circolazione forzata vengono preferiti per installazioni pensate per erogare il servizio lungo tutto l'arco dell'anno, portando dei benefici in termini di efficienza soprattutto nei mesi meno caldi.

Il circuito idraulico collegato al pannello è generalmente di tipo chiuso e separato da quello dell'acqua che riscalda mediante una serpentina posta nel serbatoio di accumulo. Le serpentine possono anche essere due per integrare la produzione di acqua calda sanitaria con un generatore di calore supplementare (accumulatori a doppio serpentino).

In alcune applicazioni, con l'ausilio di un accumulatore di calore denominato "Puffer", l'acqua calda fornita dai pannelli a circolazione forzata, può essere utilizzato per dare un contributo al riscaldamento degli ambienti.

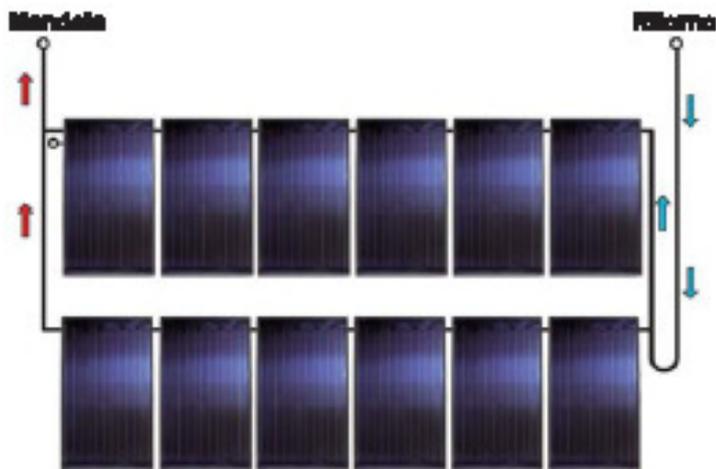


7 INSTALLAZIONE IN BATTERIA

I collettori a circolazione forzata per la loro conformazione si addicono particolarmente alle installazioni in batteria per la realizzazione di impianti di media e grande potenza.

È consigliabile che il numero massimo di pannelli che compongono una batteria non superi le 6 unità. Ciò al fine di contenere le perdite di carico del sistema e i relativi sovradimensionamenti del circolatore ed inoltre per limitare fenomeni di dilatazione termica causati dai forti sbalzi di temperatura ai quali i pannelli sono soggetti. Per installazioni di più di 6 pannelli, sono consigliate più batterie di collettori collegate in parallelo tra loro.

I sistemi di collegamento dei collettori in batteria possono essere in serie, in parallelo, o misti e dipendono sia da scelte impiantistiche sia dalla conformazione del pannello stesso.

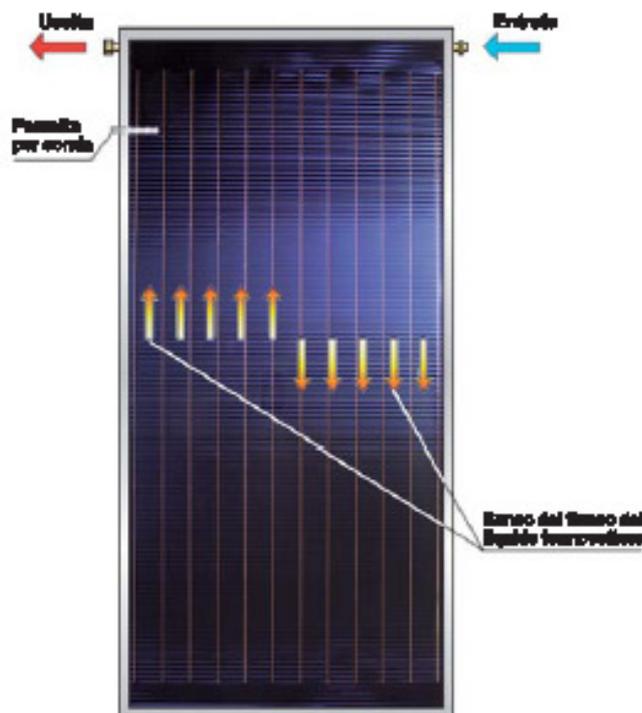


7.1 Batterie con collettori in serie a 2 attacchi

In questa tipologia di pannello l'attacco idraulico d'ingresso del fluido termovettore, è nella parte alta. Il flusso idraulico attraversa in due fasi contrapposte la superficie del pannello trovando nella mezzera del collettore d'ingresso un setto che ne devia la direzione.

Con l'abbinamento di più pannelli in serie, c'è un passaggio totale del fluido termovettore dal primo all'ultimo pannello e la portata risulta la massima in ogni collettore solare, ma le condizioni di funzionamento dei collettori in serie sono assai diverse. Dal primo collettore verso i successivi, si nota che la temperatura media delle piastre captanti tende progressivamente ad aumentare, facendo abbassare sensibilmente l'efficienza degli ultimi collettori. Quando l'impianto è appena avviato o comunque finché la temperatura dell'acqua da riscaldare è bassa, l'efficienza del sistema può essere ancora accettabile, ma quando la temperatura dell'acqua aumenta, si verifica un notevole calo di efficienza, con un limitato sfruttamento dell'impianto.

Le elevate portate necessarie a garantire il corretto scambio della batteria di collettori con l'acqua, comportano un aumento considerevole delle perdite di carico e quindi la necessità di



sistemi di circolazione maggiorati con l'aumento dei consumi elettrici.

In figura tre esempi di installazione in serie di collettori solari riferita ad un impianto con una portata nominale di 50 l/h per pannello:

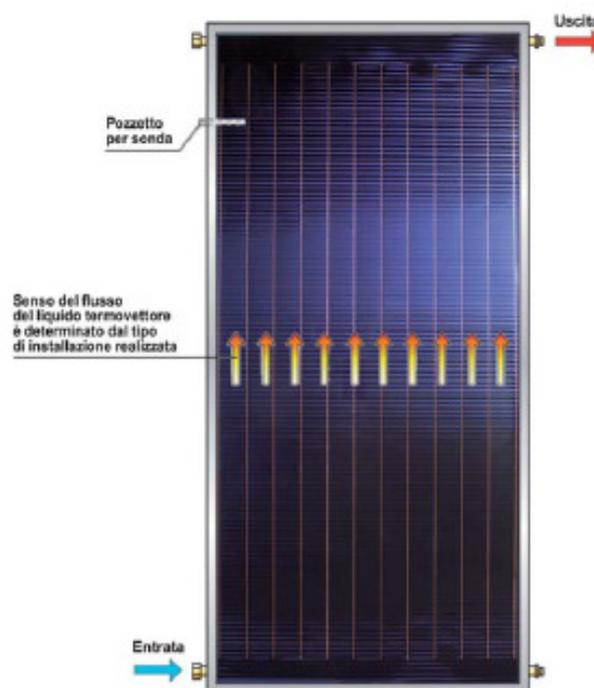


Portata di miscela	l/h	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Perdita di pressione	mbar	0	4	9	14	19	25	30	37	43	63	76

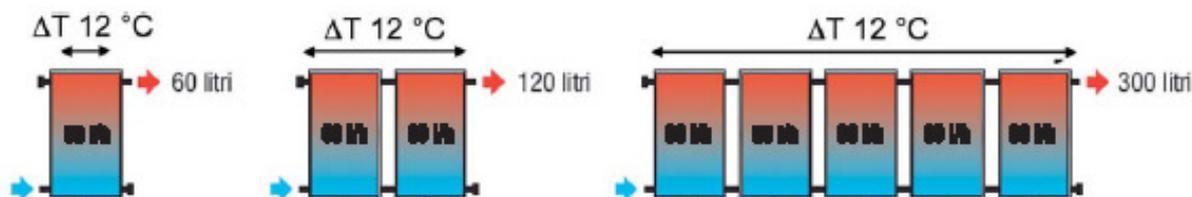
7.2 Batterie di collettori a 4 attacchi in serie

Con questa tipologia di pannello solare il fluido termovettore attraversa in un'unica direzione, dal basso all'alto, la superficie del pannello, non essendoci nessuna strozzatura sul collettore di distribuzione.

Con tale tipologia di connessione, la portata totale risulta perfettamente suddivisa su tutti i collettori della batteria, i quali lavorano tutti quanti nelle medesime condizioni di portata e temperatura. L'efficienza del sistema, con questo tipo di collegamento, arriva a i valori massimi raggiungibili assegnando ad ogni collettore la portata ottimale. Questa soluzione è la più eseguita e decisamente più vantaggiosa.



In figura tre esempi di installazione in parallelo di collettori solari riferita ad un impianto con una portata nominale di 60 l/h per pannello:

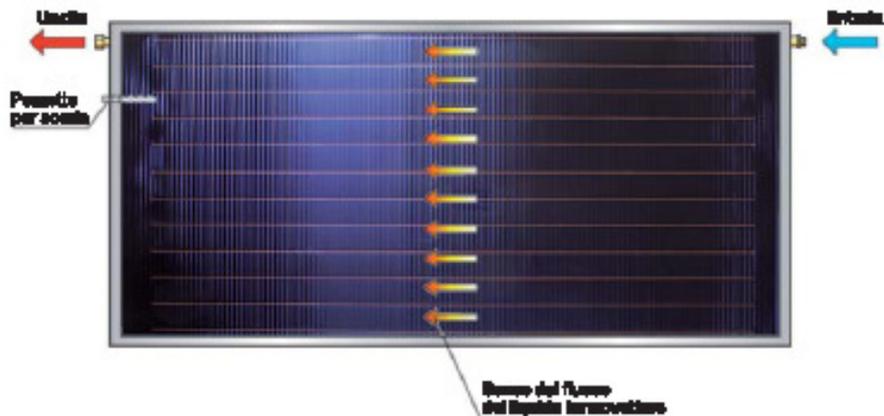


Portata di miscela	l/h	0	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
Perdita di pressione	mbar	0	1	2	3	5	6	7	8	9	10	12

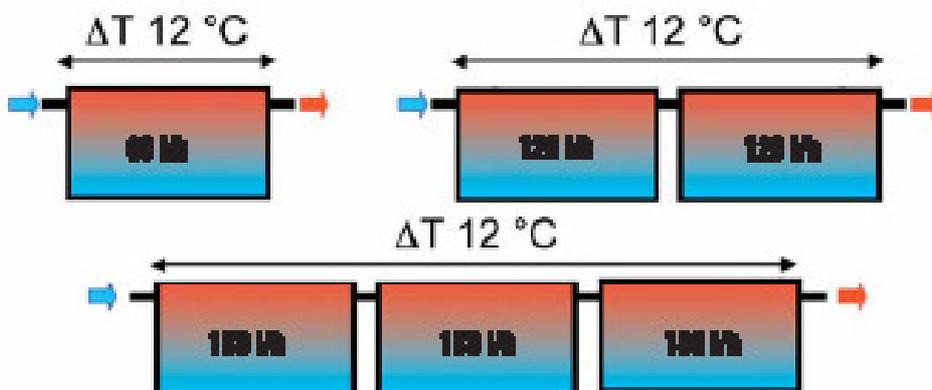
Nell'utilizzo di sistemi con pannelli a 4 attacchi, le perdite di carico diminuiscono notevolmente rispetto ad un sistema con lo stesso numero di pannelli a 2 attacchi. Questo facilita la progettazione impiantistica e permette di utilizzare componenti idraulici sottodimensionati rispetto al sistema precedente. In questo caso come notiamo in tabella possiamo utilizzare valori di portate x pannello superiori ad un sistema con abbinamento in serie.

7.3 Batterie di collettori orizzontali a 2 attacchi in serie

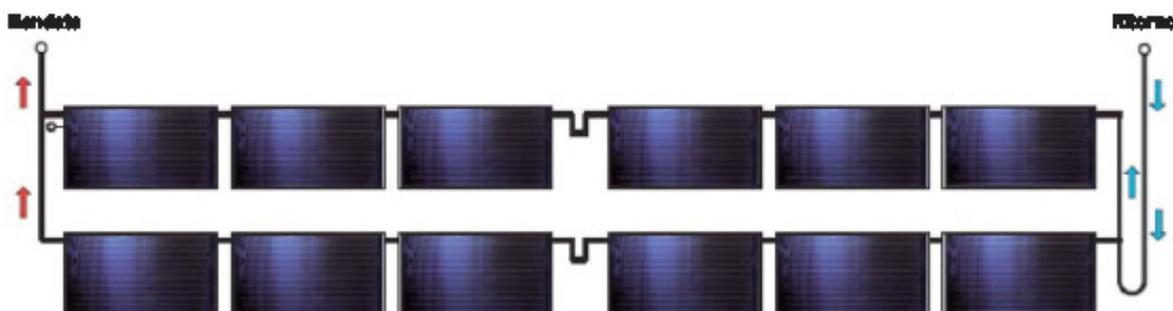
Con questa tipologia di connessione troviamo un compromesso tra portata e perdita di carico illustrati nei sistemi precedenti, ovvero abbiamo una serie di pannelli dove la superficie viene sfruttata nella stessa direzione. Infatti nel sistema a due attacchi verticali abbiamo valori di perdita di carico superiori dati dalla conformazione del pannello (suddiviso in due parti in serie tra loro). Così facendo diminuisce notevolmente la perdita di carico rispetto all'abbinamento in serie con collettori verticali, potendo lavorare con un compromesso di portata e di efficienza. L'inserimento di questa geometria di pannello risolve inoltre problematiche di installazione, di ingombri e di estetica.



In figura, tre esempi di installazione in serie di collettori solari riferita ad un impianto una portata nominale di 60 l/h per pannello:



Come indicato in figura, essendo la dimensione del sistema maggiormente sviluppata in lunghezza, è consigliabile l'inserimento di giunti di dilatazione.



8 LA STAGNAZIONE DELL'IMPIANTO SOLARE

Il problema della stagnazione sorge quando non vi sia richiesta termica da parte dell'utenza.

In tali condizioni la temperatura dei collettori sale fino a valori tali da provocare la vaporizzazione del fluido termovettore.

Di questo fatto occorre tenerne presente nella progettazione dell'impianto ed attuare le soluzioni idonee a prevenire i danni che tale fenomeno causerebbe all'impianto stesso.

La temperatura di stagnazione corrisponde a quella di equilibrio tra il flusso della radiazione solare assorbita e il flusso termico dissipato, mancando il flusso termico asportato dall'utenza.

Tale temperatura, per collettori di tipo piano è di circa 150°C, mentre per collettori a tubi sottovuoto può superare anche i 200°C, porta ad avere fluido allo stato gassoso con conseguente aumento di volume e pressione; è pertanto indispensabile dimensionare correttamente il volume del vaso di espansione di tipo chiuso.

In un circuito chiuso tradizionale è presente, oltre al vaso di espansione, una valvola di sicurezza tarata in modo tale che entri in azione quando si raggiunge una pressione prossima alla massima consentita (corrispondente a quella sopportabile dal componente più debole dell'impianto), il volume del vaso di espansione deve essere tale da evitare che l'espansione del fluido ed il conseguente aumento di pressione non provochino l'intervento della valvola di sicurezza.

Nel caso di un impianto solare occorre tener conto anche del notevole incremento di volume dovuto al possibile cambiamento di fase.

Il cambiamento di fase da liquido a vapore non dipende solo dalla temperatura a cui si trova il fluido ma anche dalla pressione così che, per pressioni crescenti, la transizione liquido-vapore avviene a temperature sempre maggiori.

Nella tabella seguente sono riportati i valori relativi all'acqua.

TEMPERATURA (°C)	PRESSIONE ASSOLUTA (bar a)	PRESSIONE MANOMETRICA (bar)	VOLUME SPECIFICO DELL'ACQUA (dm ³ /kg)
0	0,006	-0,994	1,0002
20	0,023	-0,977	1,0018
40	0,074	-0,926	1,0087
60	0,199	-0,801	1,0175
80	0,474	-0,526	1,0290
100	1,014	0,014	1,0434
110	1,433	0,433	1,0526
120	1,986	0,986	1,0616
130	2,702	1,702	1,0695
140	3,615	2,615	1,0799
150	4,762	3,762	1,0905
160	6,182	5,182	1,1013
170	7,923	6,923	1,1148
180	10,031	9,031	1,1287
190	12,557	11,557	1,1494
200	15,556	14,556	1,1565
250	39,789	38,789	1,2500
300	85,945	84,945	1,3699

La pressione di precarica del vaso di espansione è tarata in funzione dell'altezza geodetica dell'impianto, mentre il volume di espansione si esprime in funzione della sua capacità (C) e della variazione unitaria di volume specifico (coefficiente di dilatazione ε):

$$V_e = C * \varepsilon$$

Il volume utile (V_u) invece è funzione del volume di espansione (V_e), della pressione di precarica del vaso (P_{in}) e della pressione massima della valvola di sicurezza (P_{fin}):

$$V_u = \frac{V_e \times P_{fin}}{P_{fin} - P_{in}}$$

dove le pressioni sono quelle assolute.

Una tecnica per contenere al minimo il volume del vaso di espansione è pertanto quella di prevarcarlo ad una pressione tale che alla temperatura di stagnazione del pannello non possa avvenire il cambiamento di fase. Occorre però verificare se la pressione finale (ovvero quella a cui dovrà essere tarata la valvola di sicurezza) è compatibile con i componenti dell'impianto.

In generale per una temperatura di stagnazione di 150°C è possibile realizzare una precarica a 3 bar considerando che i componenti dell'impianto possono sopportare una pressione finale di 6 bar.

Per temperature di stagnazione superiori la pressione di partenza risulterebbe già troppo elevata e quindi è necessario incrementare il volume di espansione della variazione dovuta al cambiamento liquido-vapore.

Per ragioni di sicurezza la quantità di liquido considerata in cambiamento di fase e quella corrispondente a 1,1 volte il volume dei collettori e dei raccordi.

Vediamo ora un esempio pratico:

Edificio di 3 piani con collettori solari piani con temperatura di stagnazione di 150 °C posti a 10 m rispetto al piano stradale; bollitore solare e gruppo di espansione/sicurezza sono al piano interrato a -1 m rispetto al piano stradale.

Pressione al manometro dovuta al battente idrico (11 m di colonna acqua):	1.2 bar
Pressione a fine espansione per mantenere lo stato liquido:	4.0 bar
Pressione totale massima al manometro piano interrato:	5.2 bar
Pressione della valvola di sicurezza considerato una tolleranza del 10 %, inferiore a:	5.8 bar
Pressione di precarica:	3.0 bar
Capacità complessiva dell'impianto (C):	62.4 litri
Capacità dei collettori e dei raccordi (VC):	10 litri

I valori del volume specifico (dalla tabella sopra):

- alla temperatura di stagnazione di 150 °C: 1.0905 dm³/kg
- alla temperatura del bollitore in stand-by di sicurezza a 60 °C: 1.0175 dm³/kg
- a impianto freddo, notte invernale, intorno a 0 °C: 1.0002 dm³/kg

Il liquido presente nell'impianto si troverà in parte alla temperatura del collettore in condizione di stagnazione e in parte alla temperatura del serpentino scambiatore immerso nel bollitore. Con buona approssimazione si può considerare la media tra i due valori:

$$(1.0905 + 1.0175) / 2 = 1.0540 \text{ dm}^3/\text{kg}$$

La variazione unitaria di volume specifico sarà data dalla differenza:

$$\varepsilon = 1.0540 - 1.0002 = 0.0538 \text{ dm}^3/\text{kg}$$

Applicando il primo metodo:

$$V_e' = C * \varepsilon = 0.0538 * 62.4 = 3.36 \text{ l}$$

$$V_u' = \frac{V_e \times P_{fin}}{P_{fin} - P_{in}} = \frac{3.36 \times (5.2 + 1)}{5.2 - 3} = 9.47 \text{ litri}$$

Applicando invece il secondo metodo

$$V_e'' = C \cdot \varepsilon + VC = 0.0538 \cdot 62.4 + 10 \cdot 1.1 = 14.36 \text{ litri}$$

$$V_u'' = \frac{V_e'' \times P_{fin}}{P_{fin} - P_{in}} = \frac{14.36 \times (5.2 + 1)}{5.2 - 3} = 40.47 \text{ litri}$$

Queste metodologie di progettazione sono applicabili a tutti gli impianti di piccole dimensioni.

Un'ulteriore problematica dovuta alle alte temperature è inerente al deterioramento del glicole (usato come anticongelante) e al fatto che un'eventuale integrazione, dopo lo sfiato della valvola di sicurezza, possa portare a concentrazioni non ottimali dello stesso.

Nel caso di grandi impianti solari, per non far salire eccessivamente la temperatura, si usano sistemi di smaltimento del calore tramite batterie alettate.

Altra soluzione impiantistica consiste nell'adottare circuiti aperti.

In tale caso l'accumulo è quindi costituito dall'acqua di processo e non dall'acqua sanitaria che invece scorre all'interno di un serpentino posto entro l'accumulo.

Non è quindi più necessario l'uso del glicole perché quando l'impianto è fermo i collettori si svuotano automaticamente.

Non ho inoltre più problemi di espansione; si ha però il vincolo che i collettori siano a quota superiore al serbatoio di accumulo.

9 RAFFRESCAMENTO CON SISTEMA SOLARE

L'energia solare può essere utilizzata anche per la produzione di freddo mediante l'uso di macchine ad assorbimento. Tale soluzione va quindi a favore del recupero della maggiore disponibilità di energia solare che si ha nel periodo estivo.

Allo scopo risulta indicato l'utilizzo di collettori a tubi sottovuoto dato che consentono di operare con buone efficienze anche con temperature del fluido prossime a 90°C, temperature che sono richieste per un buon funzionamento di macchine frigorifere ad assorbimento.

Si utilizza quindi un impianto con scambiatori che possono fornire calore o all'ACS o all'impianto di riscaldamento/raffrescamento. Si alimenterà allora uno o l'altro a seconda del livello termico fornito dai collettori e delle richieste delle due tipologie di utenze in modo da alimentare quella a minor temperatura; una caldaia integrerà l'energia mancante a coprire il fabbisogno termico.

