



Energia solare rinnovabile

di Alberto Pietra e Francesco Fontana

L'articolo analizza alcune proprietà delle tecnologie preposte alla trasformazione della "luce" solare in energia fruibile per usi domestici o industriali; ne indica gli sviluppi possibili in termini di efficienza; ci offre un quadro delle potenzialità nell'impiego di questa forma non inquinante di approvvigionamento energetico

L'energia solare: elementi introduttivi

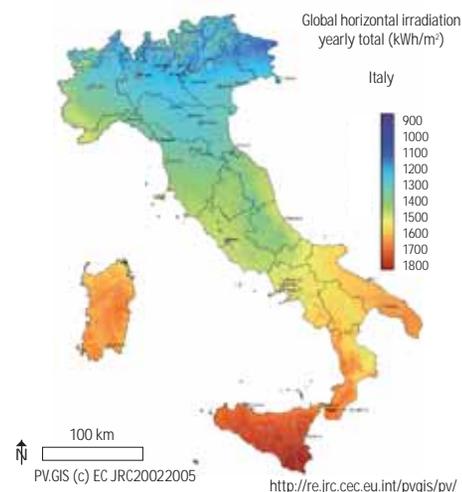
Il concetto di energia, ed in particolare la sua conservazione, è tra i primi insegnamenti impartiti durante le lezioni di fisica: nulla si crea né si distrugge.

Questo principio fondante è presto accantonato nel vocabolario corrente a favore di espressioni quali "produzione di energia", "consumo di energia", "fonte energetica rinnovabile o non rinnovabile".

Riferendoci sempre all'idea di conservazione dell'energia il significato dei termini *produzione* e *consumo* diviene quello di "trasformazione dell'energia da una forma ad un'altra" (ad esempio da meccanica ad elettrica ovvero consumo di energia meccanica per produrre energia elettrica); mentre il termine *fonte* indica sinteticamente il sistema cui è sottratta materia e/o energia nelle operazioni di trasformazione dalla sua forma originaria ad una secondaria utilizzabile nella pratica.

Il suo successivo trasferimento ed uso in un sistema utilizzatore avviene nel pieno rispetto

Figura 1 - Irradiazione solare annuale sul piano orizzontale in Italia espressa in kWh/m² (Fonte: PV-GIS)



Esempio di installazione di collettori solari (foto Kloben s.a.s.)

del principio di conservazione applicato all'insieme costituito dalla fonte, dal vettore di trasporto e dall'utilizzatore. L'aggettivo *rinnovabile* associato al concetto di fonte energetica ne specifica le caratteristiche di durata e disponibilità.

Fonte energetica rinnovabile è definita quella fonte che è virtualmente inesauribile e che alterna periodi di disponibilità a periodi d'indisponibilità (esaurimento apparente) la cui durata non sia influenzata dalle modalità di "estrazione" dell'energia.

Il Sole irradia nell'Universo $3,8 \cdot 10^{14}$ TW (terawatt) di potenza sotto forma di energia elettromagnetica, ma per effetto della distanza tra il Sole e la Terra (circa $1,495 \cdot 10^8$ km) solo una modestissima parte di tale potenza è intercettata dal nostro pianeta. Questa è stimabile in 172.500 TW. Il suo spettro di emissione (lunghezze d'onda comprese tra λ di 0,17 e 4 μ m) è di conseguenza spostato verso le onde corte, comprendendo completamente lo spettro del visibile e, quindi, quella parte di radiazione elettromagnetica che chiamiamo luce.

La densità massima di radiazione solare per unità di tempo è rappresentata dalla costante solare (G_{sc}). Questa corrisponde all'irradianza (potenza radiante per unità di superficie ricevente) solare extraterrestre su una superficie disposta normalmente alla congiungente Sole-Terra il cui valore, oggetto di numerosi studi e misure, è stato fissato dal *World Radiation Center* in 1.367 W/m² con un'incertezza dell'1%.



La radiazione solare che perviene alla superficie terrestre, avendo attraversato l'atmosfera, è modificata sia nella distribuzione spettrale sia nel valore dell'irradianza totale a causa dei fenomeni di dispersione (scattering molecolare¹) e di assorbimento.

Convenzionalmente si definisce il potenziale energetico della fonte solare in uno specifico sito terrestre come l'irradiazione solare totale su superficie orizzontale ovvero la densità di energia incidente su una superficie orizzontale (in Europa tra 900 e 1800 kWh/m² anno).

La potenza mondiale dell'energia solare è stata sottostimata

Il 10 novembre 2004, l'*International Energy Agency's Solar Heating and Cooling Programme* (IEA&SHC) pubblicò una nuova metodologia per la determinazione dell'energia termica prodotta dai sistemi solari. Il nuovo dato, espresso in prima analisi in GW_{th} (gigawattora termici) invece che in metri quadrati di collettori installati, mostra come la capacità installata sia pari a 70 GW_{th} (70.000 MW_{th}).

La potenzialità dell'energia solare termica è sottostimata, poiché le dimensioni degli impianti solari termici sono misurati tradizionalmente in metri quadrati di superficie di collettore, parametro non confrontabile con le altre fonti di energia, espresse in termini di potenza (come sarebbe, per esempio, se il fotovoltaico fosse espresso in kW_p, kilowatt di picco, e non in m²).

Creare una relazione tra i metri quadrati di collettori solari installati nel mondo con le altre tipologie di generazione, rappresentava un obiettivo primario, raggiunto con l'approvazione di una metodologia per convertire la superficie di collettori installata in potenza termica installata.

La metodologia di calcolo per passare dalla superficie installata in metri quadrati a potenza nominale, che ha portato alla determinazione di 0,7 kWh/m², si

fonda principalmente sugli standard europei per quanto concerne la prova dei collettori solari (EN 12975).

Sistemi di conversione dell'energia solare

Gli attuali sistemi di conversione dell'energia solare si basano sui *collettori solari* che intercettano la radiazione solare raccogliendola su una superficie di collezione e la inviano ad uno o più convertitori che la trasformano in energia termica o elettrica.

La quantità di energia convertibile è direttamente proporzionale alla superficie di collezione, al suo orientamento ed alle caratteristiche del convertitore.

La qualità dell'energia ottenibile dalla conversione è legata all'intensità della radiazione trasmessa al convertitore: maggiore è l'intensità migliore è la qualità. Se la superficie captante corrisponde alla superficie del convertitore, tale intensità coincide con l'irradianza solare ed è quindi limitata ad un massimo di 1 kW/m² con le migliori condizioni ambientali possibili. Tale limite è superato ricorrendo ai sistemi "concentrazione" nei quali la superficie captante è numero di volte la superficie del convertitore.

I sistemi ottici dei *collettori a concentrazione* hanno in genere un angolo di accettazione della radiazione relativamente piccolo cosicché solo la radiazione che è allineata con l'asse ottico è in grado di raggiungere il convertitore. Ne consegue che delle due componenti della radiazione solare, solo quella diretta è utilizzata efficacemente da tali tipi di collettori. Si può quindi facilmente intuire come, a parità di irradiazione totale, ma con rapporti diffusa/totale diversi, si abbia in questo caso un differente sfruttamento della fonte solare.

L'orientamento e l'inclinazione sull'orizzontale della superficie che capta la radiazione solare hanno anch'essi forte incidenza sullo sfruttamento della fonte energetica solare; è immediato constatare che mediamente si raccoglie una radiazione maggiore rispetto alla superficie orizzontale, se la superficie è rivolta a Sud ed è inclinata di un angolo pari alla latitudine del sito.

Teoricamente la fonte solare ha un potenziale enorme: si pensi che è sufficiente un'area desertica di circa 50.000

km² per disporre, sul piano orizzontale, di una radiazione annua pari a 100.000 TWh, pari all'attuale fabbisogno energetico mondiale. Il suo reale sfruttamento è determinato, però, dalla conversione in energia termica ed in energia elettrica le cui utenze mondiali non sono certo concentrate in vicinanza dei deserti e non necessitano energia esclusivamente di giorno.

La conversione termica trova applicazione diretta in questi settori: nel riscaldamento e raffreddamento ambientale, nella produzione di acqua calda di consumo; nei processi tecnologici a bassa temperatura (essiccazione, deumidificazione, dissalazione, ecc.).

Ciò avviene grazie ai sistemi solari attivi, oppure, per quanto riguarda il riscaldamento ambientale, per mezzo di sistemi passivi (strutture edilizie che fungono da collettori ed accumulatori dell'energia solare).

Trova applicazione indiretta nella produzione di energia meccanica utilizzando opportuni cicli termodinamici quali il ciclo *Stirling* (pompe solari per acqua) ed il ciclo *Rankine* per la produzione di energia elettrica.

Il problema centrale per lo sfruttamento dell'energia solare, comune a tutti i sistemi di conversione, è la necessità di disporre di impianti di accumulo dell'energia secondaria prodotta, non essendo possibile conglomerare direttamente l'energia solare così come avviene con l'energia idraulica.

Uno sfruttamento intensivo di tale fonte è quindi correlato ad una configurazione di utilizzo finale che consenta uno stoccaggio affidabile ed a basso costo della forma energetica finale.

Collettore solare a circolazione naturale (foto Klöben s.a.s.)



¹ L'effetto macroscopico di tale fenomeno è una riflessione verso lo spazio siderale di parte della radiazione incidente sull'atmosfera e la comparsa di una radiazione deviata che raggiunge la superficie terrestre da tutte le direzioni. Tale radiazione deviata è indicata con il nome di radiazione solare diffusa o irradianza diffusa, G_d (W/m²). La radiazione non intercettata dalle molecole mantiene invece come unica direzione quella d'incidenza ed è quindi indicata come radiazione solare diretta o irradianza diretta, G_b (W/m²).



In questa prospettiva l'utenza maggiormente idonea è quella termica a bassa temperatura (minore di 100 °C), quali il riscaldamento ambientale, la produzione di acqua calda di consumo e le applicazioni industriali che nei Paesi più avanzati rappresentano in media più di un terzo dell'intero fabbisogno energetico.

A tale scopo da diversi anni sono allo studio ed in esercizio impianti centralizzati di riscaldamento con accumuli interstagionali (dall'estate all'inverno) dell'energia termica di origine solare.

Considerazioni generali

Il cuore di ogni collettore solare è l'assorbitore. Grazie a lui la radiazione solare incidente sulla sua superficie è trasformata in calore. Parte di questo è trasferito al fluido termo-vettore (generalmente acqua o una miscela di acqua e glicole) e la restante parte è dispersa nell'ambiente.

Ogni collettore, ad eccezione di quelli solari piani non vetrati (utilizzati principalmente per il riscaldamento delle piscine), possiede una copertura trasparente che separa l'assorbitore dall'ambiente esterno e simultaneamente trasmette la quantità più elevata possibile di radiazione solare incidente. Per molti collettori, i pannelli isolanti costituiscono un altro importante componente per diminuire le perdite di calore dell'assorbitore per conduzione.

Bilancio energetico del collettore solare

In regime stazionario, la radiazione solare incidente sulla superficie del collettore è uguale alla somma del calore utilizzato e delle differenti tipologie di perdite termiche. Di conseguenza il bilancio energetico dell'assorbitore di un collettore solare può essere determinato dalla relazione seguente:

$$A \cdot G_{\perp} = \dot{Q}_{\text{utile}} + \dot{Q}_{\text{perdite ottiche}} + \dot{Q}_{\text{perdite convettive}} + \dot{Q}_{\text{perdite conduttive}} + \dot{Q}_{\text{perdite radiative}} \quad [1]$$

dove:

A è la superficie dell'assorbitore in m²;

G_{\perp} è la radiazione solare globale incidente sulla superficie del collettore solare espressa in W/m²;

\dot{Q}_{utile} è la potenza utile del collettore

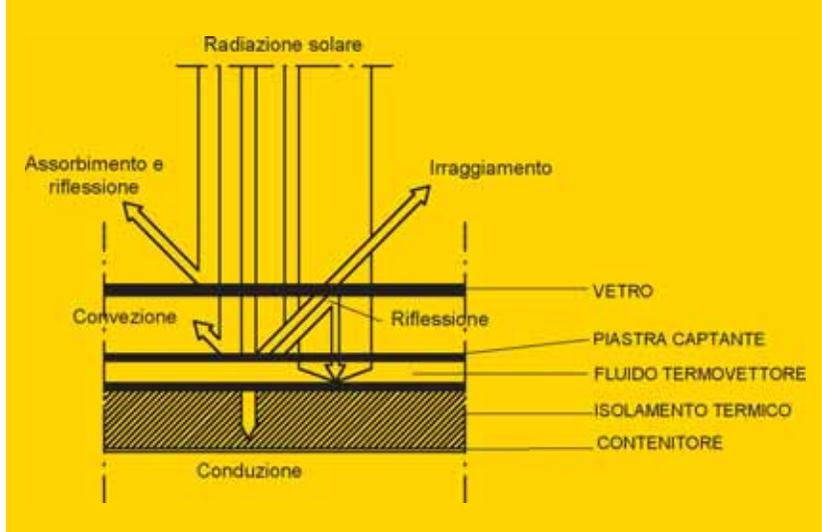


Figura 2 - Bilancio termico di un collettore solare piano vetrato

espressa in W;

$\dot{Q}_{\text{perdite ottiche}}$ sono le perdite ottiche del collettore esprese in W: questo termine include tutte le perdite dovute alla riflessione e all'assorbimento della copertura trasparente del collettore solare, la porzione di radiazione solare che non raggiunge l'assorbitore;

$\dot{Q}_{\text{perdite convettive}}$ esprime le perdite per convezione in W. La convezione naturale è generata all'interno dell'intercapedine d'aria posta tra la superficie vetrata della copertura trasparente e la piastra assorbente, creando un flusso di calore dall'assorbitore alla copertura trasparente;

$\dot{Q}_{\text{perdite conduttive}}$ esprime le perdite per conduzione in W. Il flusso di calore è trasmesso per conduzione dall'assorbitore al telaio attraverso gli strati di isolante posti dietro al primo (dipende dalla tipologia costruttiva del collettore solare);

$\dot{Q}_{\text{perdite radiative}}$ esprime le perdite per radiazione in W, dovute alla temperatura dell'assorbitore che emette radiazione termica nello spettro dell'infrarosso determinando appunto una dispersione. Queste differenti tipologie di perdite influiscono in modo diverso sul bilancio energetico del collettore solare secondo la sua temperatura di servizio e di quella dell'assorbitore. Differenti misure per

ridurre queste perdite possono essere prese per massimizzare la potenza utile del collettore solare.

La scelta di tali misure è determinata dalla temperatura operativa e dalla tipologia del collettore.

Le soluzioni adottabili singolarmente o in combinazione sono le seguenti.

- **Diminuzione delle perdite per trasmissione:** applicando uno strato anti-riflettivo sulla superficie vetrata del collettore. Se si utilizza questa tipologia di vetro come copertura trasparente, la trasmissione solare può essere incrementata fino ad arrivare al 96%, con un conseguente aumento annuo della potenza termica variante tra 5% e l'8%².

- **Diminuzione delle perdite per convezione:** creando il vuoto tra la superficie trasparente e l'assorbitore (tecnologia utilizzabile solo con collettori solari cilindrici, per evidenti ragioni di resistenza dei materiali) funzionale alla geometria del collettore.

Una riduzione della pressione di circa 100 Pa (Pascal) è sufficiente ad eliminare completamente la convezione naturale. Un'altra soluzione è di utilizzare una doppia copertura del collettore (due strati di vetro ed un film di polycarbonato) o l'utilizzo di un materiale isolante trasparente (TIM - Materiale Isolante Trasparente) a nido d'ape, in modo da prevenire la formazione di una grande cella di convezione e ridurre le perdite.

- **Diminuzione delle perdite per conduzione:** dipende dalla geometria del collettore. Per quelli con isolamento opaco sul retro occorre aumentare lo spessore dell'isolante; meglio sarebbe utilizzare un isolante con una conducibilità più bassa così da evitare dimensioni troppo elevate del collettore solare.

Se il gas contenuto nell'intercapedine tra la superficie vetrata e l'assorbitore contribuisce alle perdite di calore per conduzione, una soluzione può essere quella di utilizzare gas inerti o creare uno strato

² Ronnel M., Gambert A., Koshikowski J., Schäfer A. and Schmitt (2003), *Which improvements can be archived using single and double AR-glass covers in flat plate collectors?* Conferenza Europea sull'Energia Termica Solare ESTEC - 26, 27 giugno 2003 Friburgo, Germania.



to sottovuoto.

Tuttavia, per diminuire in modo considerevole le perdite per conduzione nell'intercapedine, è necessaria una riduzione della pressione interna a pochi Pa.

Questo risparmio può essere raggiunto solo se i materiali utilizzati per la costruzione del collettore solare hanno caratteristiche di tenuta ai gas e componenti capaci di assorbire molecole di gas libere.

- *Diminuzione delle perdite per radiazione:* può essere ottenuta utilizzando un trattamento selettivo sull'assorbitore.

Questa operazione genera un film capace di produrre un elevato assorbimento nello spettro del visibile della radiazione solare, ma una remissività molto bassa nello spettro dell'infrarosso, in modo da non disperdere calore verso l'esterno.

Fino a pochi anni fa la produzione dello strato selettivo sugli assorbitori era effettuata attraverso un processo elettrochimico. Oggi questi trattamenti sono effettuati in modo da rispettare l'ambiente come la spruzzatura *physical vapour depositing*, (PVD).

- *Diminuzione delle perdite termiche:* occorre utilizzare il *concentratore ottico*. La radiazione utile sul collettore è proporzionale alla sua superficie d'apertura, mentre tutte le perdite di calore sono proporzionali alla superficie dell'assorbitore. Quindi, una costruzione dei collettori solari in cui la superficie dell'apertura è maggiore rispetto alla superficie dell'assorbitore porta ad una riduzione delle perdite di calore.

Un approccio è quello di usare degli specchi per concentrare la radiazione solare sull'assorbitore. Tuttavia, la concentrazione geometrica è possibile solo per la componente diretta della radiazione solare.

Sistemi che possiedono un elevato fattore di concentrazione devono seguire il sole a scapito della perdita di una parte della radiazione diffusa. Il fattore di concentrazione è dato dal rapporto tra l'area dell'apertura e l'area dell'assorbitore.

Un indicatore prestazionale del collettore è il suo rendimento. Tale resa è definita come il rapporto tra il calore utile e la radiazione solare globale incidente sulla superficie del collettore.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{utile}}}{A \cdot G_{\perp}} \quad (2)$$

L'efficienza di un collettore solare può

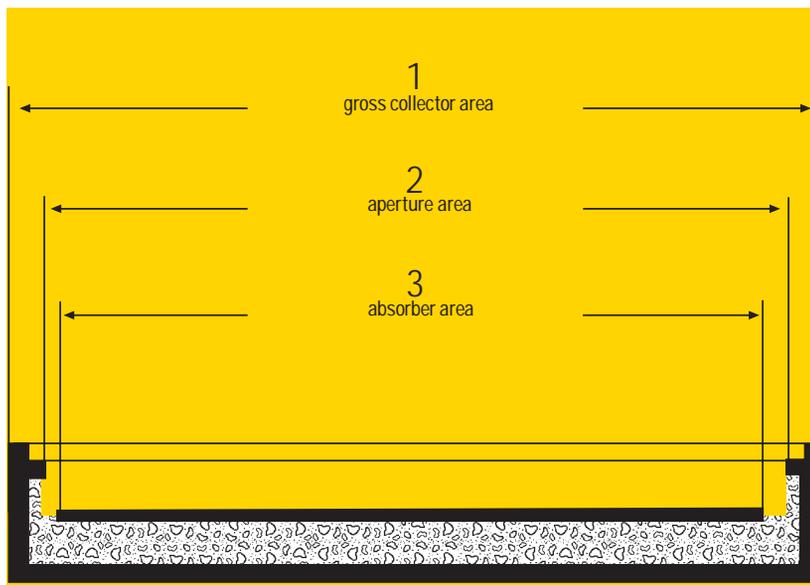


Figura 3 - Definizione delle differenti aree di un collettore

essere scritta come segue:

$$\eta = k(\Theta) \cdot c_0 - c_1 \cdot \frac{(T_{mc} - T_{amb})}{G_{\perp}} - c_2 \cdot \frac{(T_{mc} - T_{amb})^2}{G_{\perp}} \quad (3)$$

Questa equazione proviene direttamente dal bilancio di energia dell'equazione 1 e dalla definizione di fattore di efficienza dato dall'equazione 2, se tutte le perdite non lineari sono approssimate da un'espressione quadratica. La simbologia utilizzata nell'equazione 3 è la seguente:

$k(\Theta)$ tiene conto dell'influenza della radiazione solare non perpendicolare all'angolo di incidenza, Θ rispetto alla radiazione incidente normale con $\Theta=0$. L'equazione 3 rappresenta solo un'approssimazione dell'influenza dell'angolo d'incidenza sulle prestazioni ottiche del collettore solare. In un'analisi fisica dettagliata, l'influenza dell'angolo d'incidenza deve essere considerata separatamente per la radiazione diffusa e diretta; T_{mc} è la temperatura media del fluido all'interno del collettore solare. Per portate tipiche, la temperatura media del fluido all'interno del collettore può essere approssimata dalla media aritmetica tra la temperatura d'ingresso e di uscita del fluido nel collettore;

T_{amb} è la temperatura dell'ambiente in cui si trova il collettore;

c_x sono i valori di efficienza del collettore:

- c_0 definisce il valore del coefficiente di efficienza ottica;
- c_1 il coefficiente di perdita lineare;
- c_2 il coefficiente di perdita quadratico.

Si possono formulare differenti definizioni di aree di un collettore solare, esse sono mostrate usando come esempio un collettore

solare piano vetrato (fig. 3).

1. *Gross collector area:* è definita dalle dimensioni esterne del collettore solare.

2. *Aperture area:* è definita dalla geometria della copertura trasparente o dall'area di proiezione del riflettore nel caso di collettori a concentrazione.

3. *Absorber area:* è l'effettiva dimensione del componente che assorbe la radiazione solare.

Il valore di efficienza del collettore può variare in modo considerevole in funzione della superficie che è stata presa come riferimento.

Pertanto, risulta molto importante indicare l'area di riferimento adottata nel dimensionamento dell'impianto solare.

Le curve di efficienza del collettore sono di norma espresse come funzione del rapporto tra la differenza di temperatura calcolata tra quella media del fluido termovettore, T_{mc} , e quella dell'aria dell'ambiente, T_{amb} , e la radiazione solare incidente sul collettore:

$$\eta = k(\Theta) \cdot c_0 - c_1 \cdot x - c_2 \cdot x^2 \cdot G_{\perp} \quad \text{dove} \quad x = \frac{(T_{mc} - T_{amb})}{G_{\perp}} \quad (4)$$

In generale una curva di efficienza identifica le differenti perdite di un collettore (fig. 4).

Un'altra comune rappresentazione del rendimento del collettore è illustrata nella figura 5.



In questo caso, le curve del rendimento del collettore solare sono rappresentate per differenti valori della radiazione solare incidente sul collettore come funzione della differenza tra la temperatura media del fluido termo-vettore e la temperatura dell'aria, $T_{mc} - T_{amb}$.

La figura 4 dimostra che, per determinate temperature differenti, l'efficienza regredisce con il diminuire della radiazione solare; in questo modo l'energia risparmiata dai collettori solari deve essere ridotta.

In assenza di prelievo di acqua calda, che è registrato dal collettore solare come una mancata sottrazione di calore, ed in particolari condizioni climatiche, può succedere che l'assorbitore si surriscaldi, quindi i ΔT aumentano e, di conseguenza, le perdite termiche globali si incrementano fino a quando eguagliano il valore di efficienza ottica.

In queste condizioni l'efficienza istantanea del collettore è uguale a zero ovvero tutta l'energia incidente è dispersa per convezione, conduzione ed irraggiamento.

Si ricorda che le dispersioni termiche,

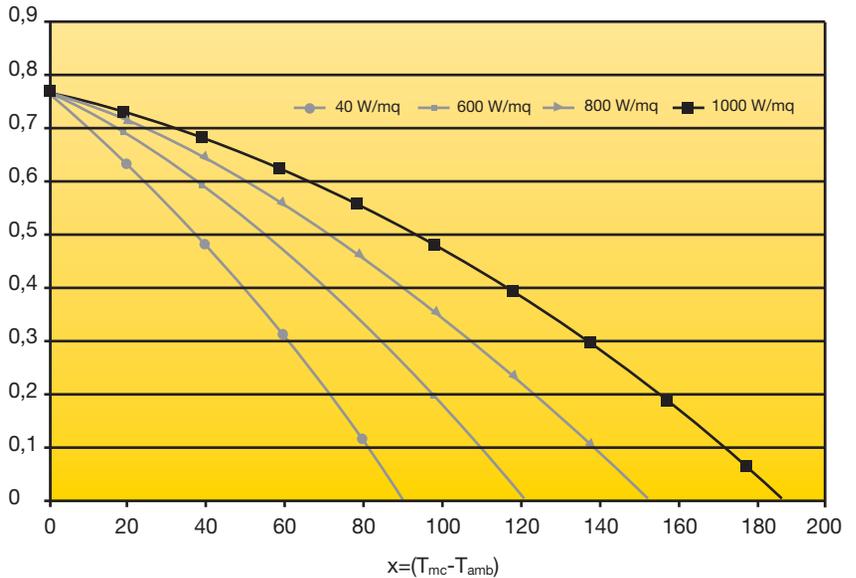


Figura 5 - Rendimento di un collettore solare contro la differenza tra la temperatura media del fluido e la temperatura dell'aria esterna per diversi valori della radiazione solare incidente

oltre un certo valore di temperatura della piastra, non aumentano più in modo lineare con la differenza di temperatura, ma aumentano proporzionalmente al quadrato della differenza di questa. Questa temperatura di equilibrio è defini-

ta "temperatura di ristagno", ed aumenta con l'irraggiamento. Nei collettori piani ben isolati può raggiungere i 160 - 200 °C mentre nei collettori sottovuoto i 200 - 300 °C e, se dotati di concentratori parabolici, anche i 350 °C.

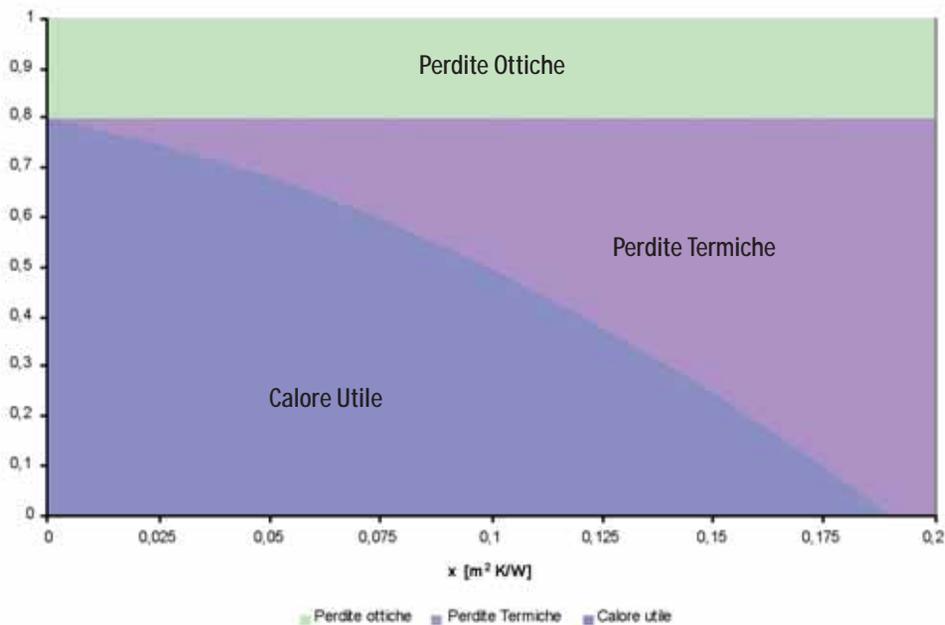


Figura 4 - Curva tipica di efficienza di un collettore solare. L'efficienza è espressa come funzione di un parametro x definito nell'equazione. Sono qui mostrate le principali perdite e l'energia utilizzata