



Università degli Studi di Torino
FACOLTA' di SCIENZE M.F.N.
Corso di Laurea in FISICA



LA FISICA DEL SOLAR COOLING

Candidato: Dario Ricciardo

Relatore: Prof. Paolo Gambino

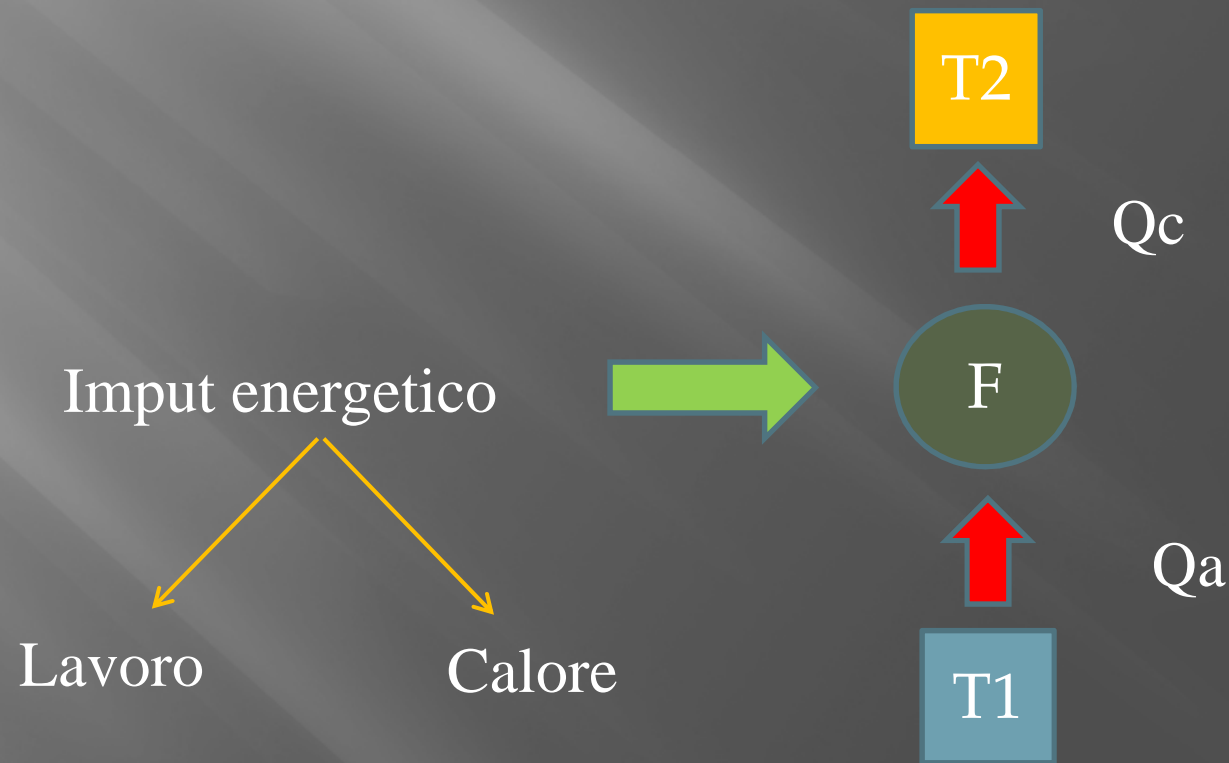
Anno Accademico 2010-2011

Obiettivi dello studio

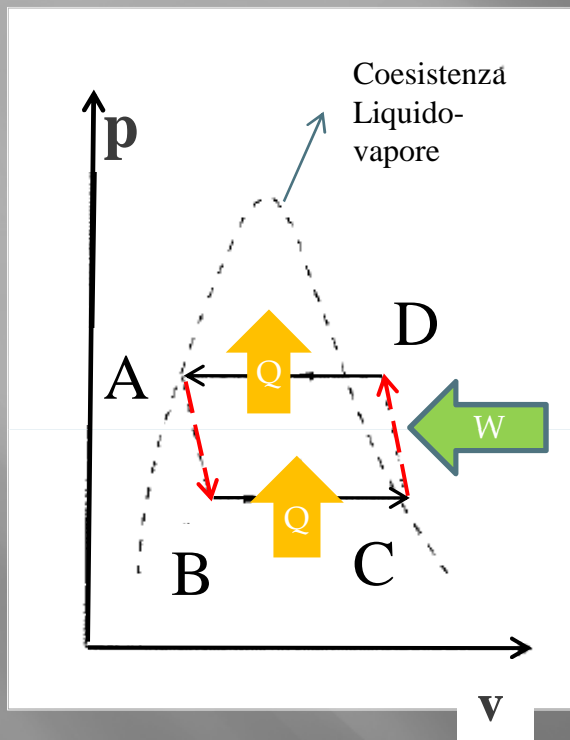
- ▣ Studiare i principi di funzionamento di alcuni cicli frigoriferi alimentati ad energia termica,ottenuta convertendo quella associata alla radiazione solare, confrontandoli con quelli di un ciclo frigorifero standard, alimentato ad energia elettrica.
- ▣ Simulare il funzionamento giornaliero di un sistema di solar cooling per stimare la superficie di collettori necessaria a soddisfare un dato carico frigorifero con una data macchina.
- ▣ Riconoscere pregi e difetti di tale tecnologia.

Macchina frigorifera

E' un dispositivo che estrae calore da una sorgente fredda e lo cede a una più calda, assorbendo energia dall'esterno.



Il ciclo frigorifero a compressione di vapore



AB: espansione irreversibile;
BC: trasformazione isoterma e isobara (evaporazione);
CD: compressione adiabatica;
DA: trasformazione isobara e poi anche isoterma (condensazione);

L'input energetico è costituito dal lavoro che dall'esterno bisogna compiere sul sistema per comprimere il vapore di refrigerante; il lavoro è compiuto generalmente da un motore elettrico.

I cicli ad assorbimento

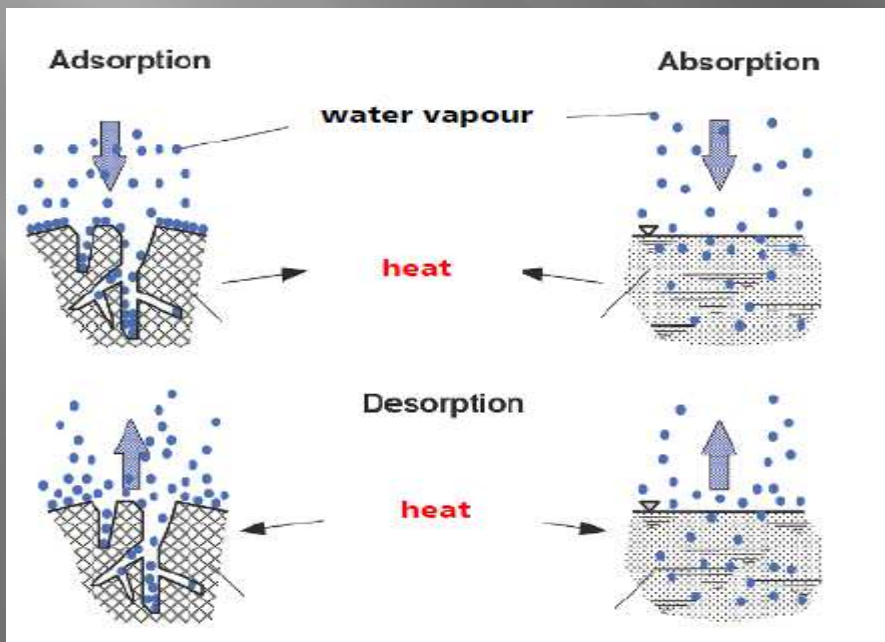
La differenza è solamente nella fase di compressione del vapore a bassa pressione in uscita dall'evaporatore: invece di agire direttamente sul vapore di refrigerante, si usa una sostanza assorbente che porta il vapore alla pressione del condensatore. Alla pressione del condensatore essa viene separata dal vapore, grazie all'azione di una fonte di calore.



Un eventuale disponibilità di energia termica, possibilmente di costo inferiore a quella elettrica, può rappresentare un'alternativa alla compressione meccanica.

Ab vs Ad

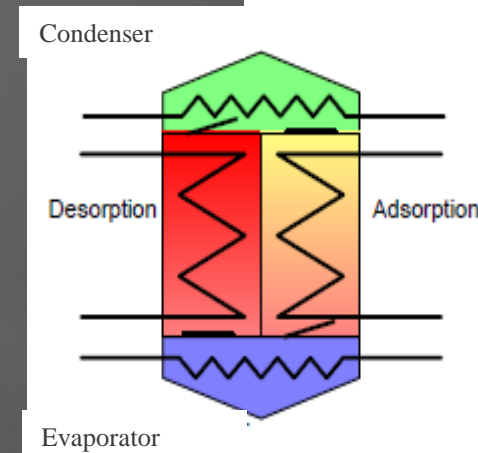
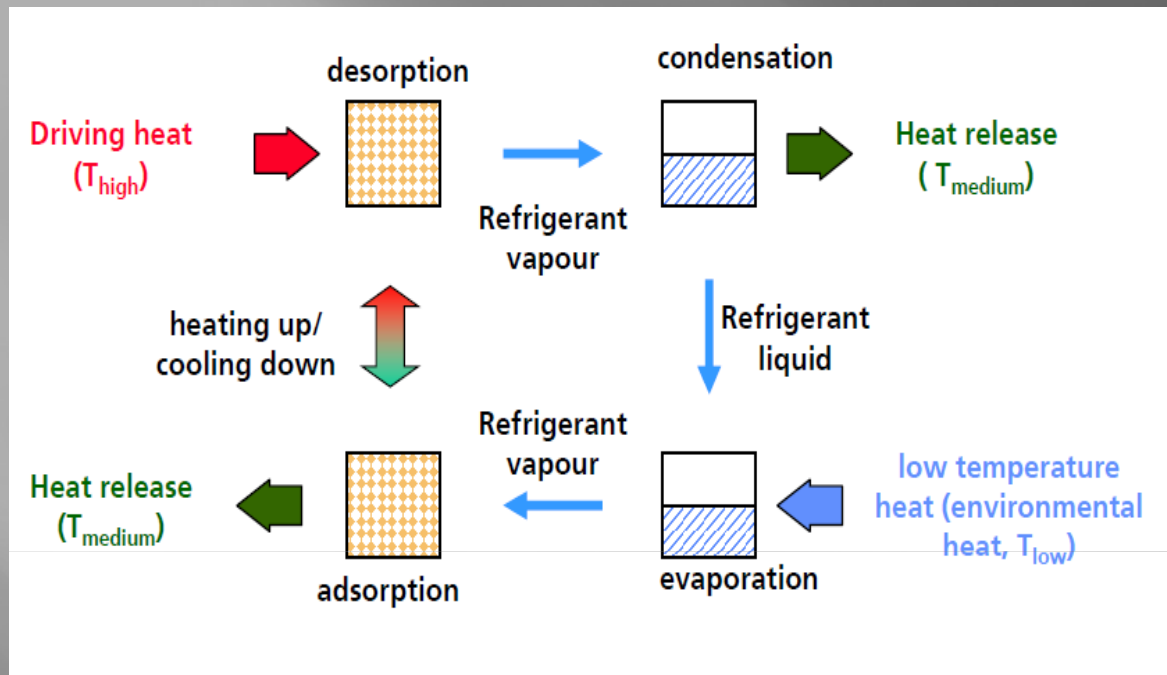
- **A**Dsorbimento: una sostanza in una data fase (e.g. vapore) viene accumulata sulla superficie di un'altra sostanza in una fase diversa (e.g. solido); (es. Vapore acqueo-Zeolite)
- **A**Bsorbimento: una sostanza in una data fase (e.g. vapore) viene incorporata in un'altra sostanza in un fase diversa; (es. Vapore acqueo-LiBr)



Sono entrambi processi esotermici:

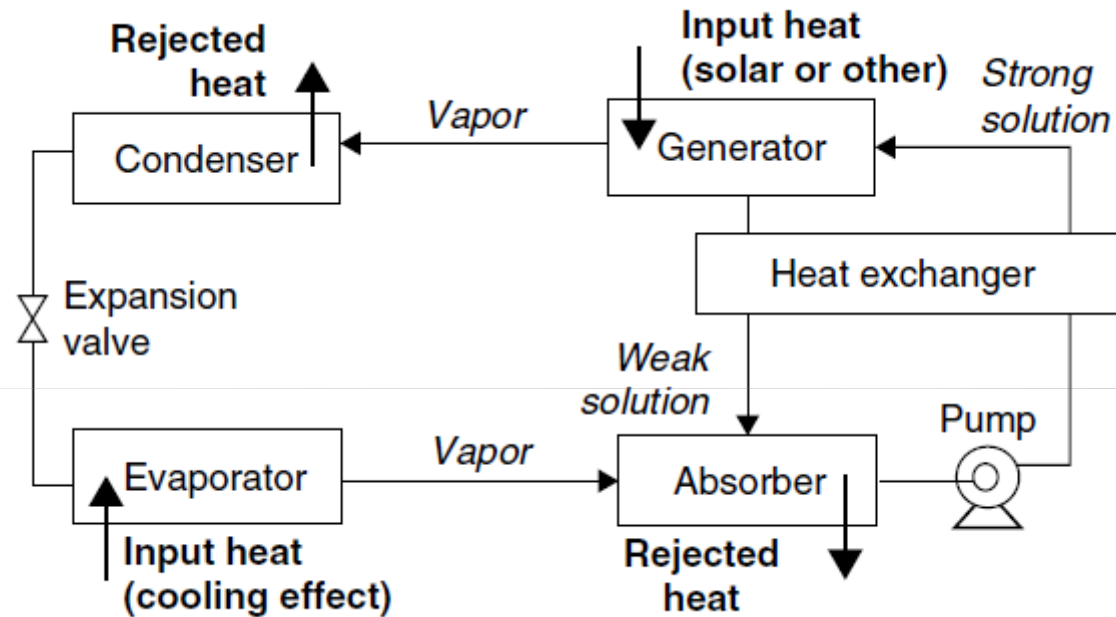


La macchina ad adsorbimento



Ogni camera ,adsorbito il vapore in uscita dall'evaporatore,viene preriscaldata e portata alla pressione del condensatore;qui il calore fornito da un fluido caldo provoca il desorbimento del vapore,che subisce la stessa sequenza di condensazione ,laminazione ed evaporazione di un ciclo a compressione.Perchè la camera possa ri-adsorbire il vapore,essa deve essere raffreddata e riportata alla pressione dell'evaporatore.

La macchina ad assorbimento



H₂O-LiBr

A differenza del ciclo standard, ad essere portato alla pressione del condensatore non è più del vapore ma una soluzione liquida; il consumo di energia elettrica, dovuto solo all'alimentazione della pompa, è dunque ridotto (circa l'1% di Q_E).

Il coefficiente di prestazione (C.O.P.)

$$C.O.P. = \frac{\text{Energia sottratta alla sorgente fredda}}{\text{Energia fornita dall'esterno alla macchina}}$$

Assorbimento

Compressione

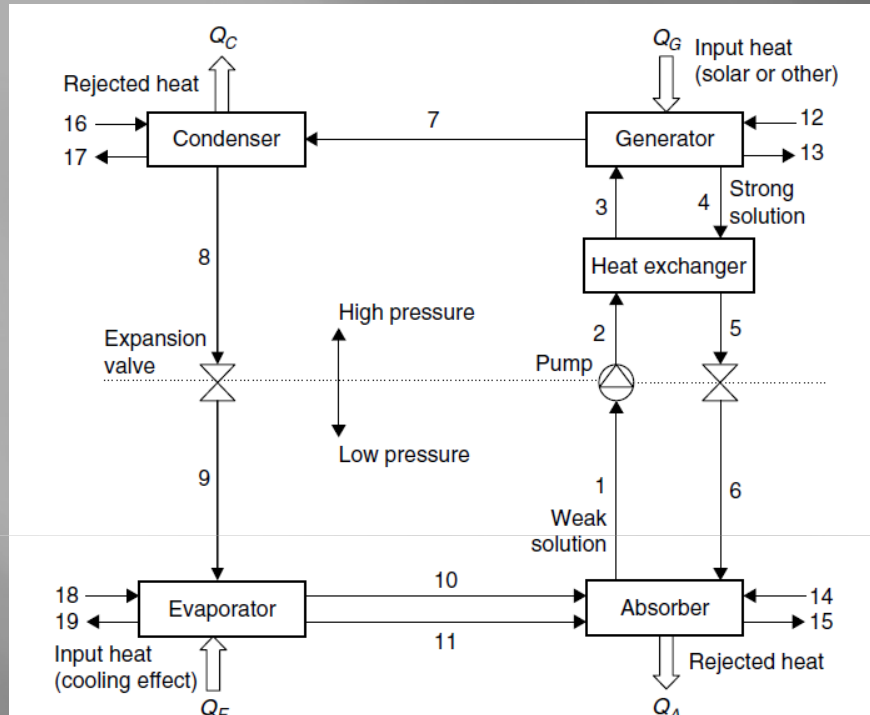
$$\frac{\text{Energia sottratta nell'evaporatore}}{\text{Energia fornita al generatore}}$$

$$\frac{\text{Energia sottratta nell'evaporatore}}{\text{Energia fornita al compressore}}$$

•E' una misura della qualità della performance della macchina:

l'energia sottratta alla sorgente fredda è C.O.P –volte quella da spendere per far funzionare la macchina.

Il C.O.P. di una macchina ad H₂O-LiBr.



Ogni componente del ciclo va trattato come un sistema aperto, in generale a più entrate ed uscite, in cui il fluido refrigerante scorre in regime stazionario, cui vadano imposti i principi di conservazione di massa ed energia.

• Massa:

$$\sum_{\text{numero delle entrate}} \dot{m}_e = \sum_{\text{numero delle uscite}} \dot{m}_u$$

• Energia:

$$(\dot{Q} - \dot{L}) = \sum \dot{m}_u (h_u) - \sum \dot{m}_e (h_e)$$

Componente	Conservazione massa	Conservazione energia
Pompa	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ $x_1 = x_2$	$\dot{L} = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2$
Scambiatore soluzione	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$ $x_2 = x_3$ $\dot{m}_4 = \dot{m}_5$ $x_4 = x_5$	$0 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5 - (\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4)$ ↓ $\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4$
Valvola espansione soluzione	$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$ $x_5 = x_6$	$0 = \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_5 h_5$ ↓ $h_5 = h_6$
Absorbitore	$\dot{m}_{10} + \dot{m}_{11} + \dot{m}_6 = \dot{m}_1$ $\dot{m}_{10} x_{10} + \dot{m}_{11} x_{11} + \dot{m}_6 x_6 = \dot{m}_1 x_1$	$\dot{Q} = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_{11} h_{11} - \dot{m}_6 h_6 \triangleq \dot{Q}_a$
Generatore	$\dot{m}_3 = \dot{m}_7 + \dot{m}_4$ $\dot{m}_3 x_3 = \dot{m}_7 x_7 + \dot{m}_4 x_4$	$\dot{Q} = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_3 h_3 \triangleq \dot{Q}_g$
Condensatore	$\dot{m}_7 = \dot{m}_8$ $x_7 = x_8$	$\dot{Q} = \dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_7 h_7 \triangleq \dot{Q}_c$
Valvola espansione refrigerante	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$ $x_8 = x_9$	$0 = \dot{m}_9 h_9 - \dot{m}_8 h_8$ ↓ $h_8 = h_9$
Evaporatore	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} + \dot{m}_{11}$ $x_9 = x_{10}$	$\dot{Q} = \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{11} h_{11} - \dot{m}_9 h_9 \triangleq \dot{Q}_e$

$$C.O.P. = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{11} h_{11} - \dot{m}_9 h_9}{\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_3 h_3}$$



$$C.O.P. = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{\dot{m}_{19} h_{19} - \dot{m}_{18} h_{18}}{\dot{m}_{13} h_{13} - \dot{m}_{12} h_{12}}$$

Attraverso l'entalpia, il C.O.P. dipende dalle temperature dei fluidi che cedono calore al generatore e all'evaporatore, ossia dalle sorgenti di Q_g e Q_e .

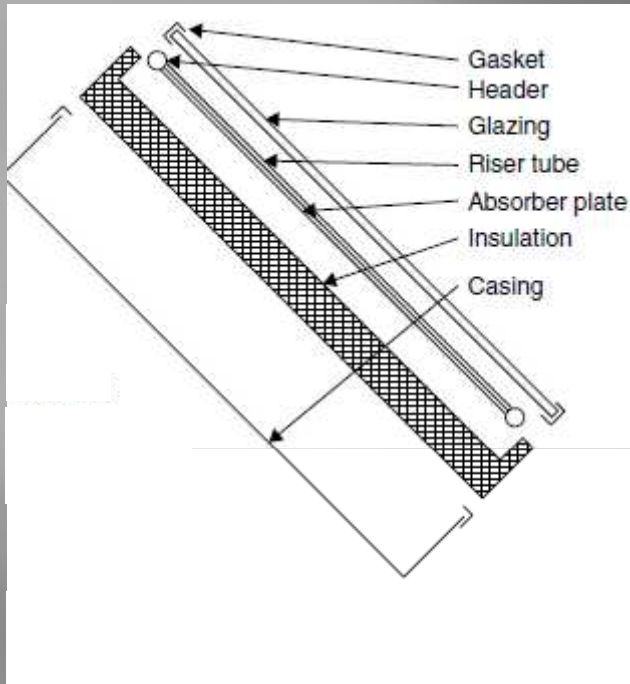
Capacità	$\dot{Q}_e = 1KW$
Temperatura evaporatore	$T_{10} = 6^\circ C$
Temperatura uscita sol. gen.	$T_4 = 75^\circ C$
Frazione massa sol. debole	$x_1 = 0.55 \text{ (LiBr)}$
Frazione massa sol. forte	$x_1 = 0.60 \text{ (LiBr)}$
Temperatura uscita sol hx	$T_3 = 55^\circ C$
Temperatura uscita vapore gen.	$T_7 = 70^\circ C$
Portata massica liquido dall'evaporatore	$\dot{m}_{11} = 0.025 \dot{m}_{10}$

Data una macchina frigorifera reale ad Acqua e LiBr di potenza refrigeratrice $Q_e=1KW$, è possibile, conoscendo i parametri di funzionamento e supponendo che negli stati 1,4,8,10 e 11 il fluido sia in condizioni di saturazione, calcolare Q_g e dunque ottenere un'espressione numerica del C.O.P. :

$$C.O.P. = \frac{Q_e}{Q_g} = \frac{1KW}{1.35KW} = 0.74$$

La condizione di saturazione del fluido in determinati stati è necessaria per ricavare più parametri termodinamici (e.g. P ed h) in funzione di un altro noto (e.g. T), sfruttando il fatto che esista una precisa relazione tra le variabili che descrivono uno stato di saturazione.

Come ottenere Q_g attraverso la radiazione solare?



Un collettore solare piano è un dispositivo che converte l'energia solare assorbita da una lastra annerita in energia termica trasportata da un fluido con cui la lastra è in contatto termico; il calore assorbito dal fluido può rappresentare la sorgente energetica con cui alimentare il ciclo ad assorbimento.

La percentuale di energia che il collettore trasmette al fluido termovettore dipende dalle perdite di calore per conduzione, convezione e irraggiamento.

Efficienza del collettore

La prestazione di un collettore è caratterizzata dalla sua efficienza, definibile genericamente come:

$$\eta = \frac{\text{Energia trasmessa al fluido termovettore}}{\text{Energia solare incidente}}$$

L'espressione approssimata dell'efficienza del pannello solare è data dall'equazione:

$$\eta = \eta_o - a_1 \cdot \frac{(T_m - T_a)}{G} - a_2 \cdot G \cdot \left(\frac{T_m - T_a}{G} \right)^2$$

Dove:

$G \rightarrow$ Irraggiamento [W/m^2]

$\eta_o \rightarrow$ fattore di conversione

$a_1, a_2 \rightarrow$ Coefficienti di dispersione

$T_m \rightarrow$ Temperatura media del pannello

$T_a \rightarrow$ Temperatura dell'aria



Sono parametri caratteristici del tipo di collettore considerato e vengono forniti dal costruttore.

Sistema pannello-accumulo-macchina

L'obiettivo è quello di simulare il funzionamento giornaliero di un'impianto costituito da una certa superficie collettrice, un accumulatore di calore ed una data macchina frigorifera ad assorbimento di cui si conosca la capacità refrigeratrice ed il C.O.P.. Quest'ultima è da considerarsi come una "scatola chiusa" capace di sottrarre la quantità Q_e al mezzo da refrigerare, a patto che essa venga alimentata dal calore $Q_g = Q_e / \text{C.O.P.}$, fornitele dall'acqua che, dopo essere stata scaldata dal collettore, viene immagazzinata in un accumulatore (una cisterna).



Il programma, scritto utilizzando il software "Mathematica", ha proprietà di generalità e può essere utilizzato per valutare il comportamento del sistema per pannelli, cisterne e macchine frigorifere con caratteristiche differenti e in posizioni geografiche diverse.

Acquisizione e calcolo grandezze utili

Per valutare l'efficienza del collettore in uso, bisogna disporre delle seguenti grandezze:

- Temp.media pannello: stimata come media delle temperature del fluido in ingresso e uscita dal collettore;
- Temp.dell'aria circostante: acquisite da “Mathematica” attraverso “WeatherData”;
- Irraggiamento: stimato, nell'ipotesi di funzionamento del sistema in una tipica limpida giornata estiva, moltiplicando la costante solare sulla superficie terrestre ($G_0 \approx 1000 \text{ W}$) per il coseno dell'angolo di incidenza della radiazione solare su una superficie inclinata di un angolo β rispetto all'orizzontale.

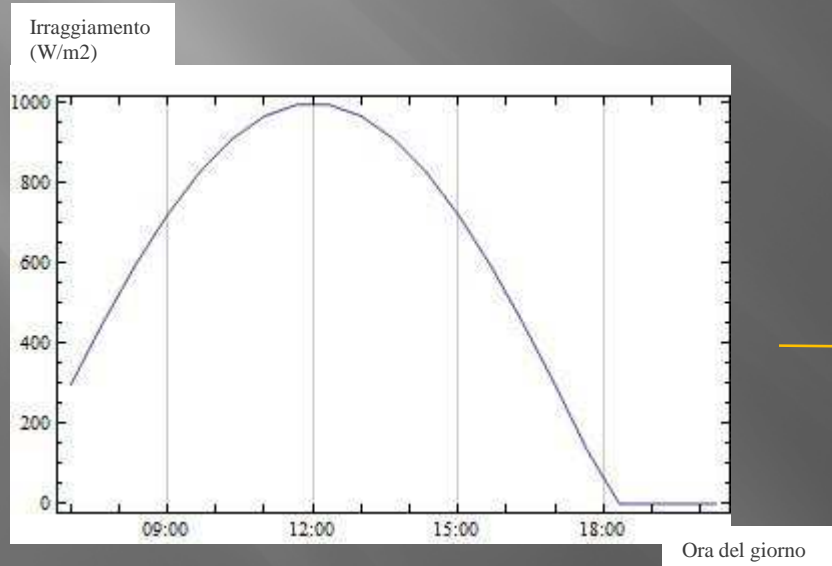


$$G = G_0 \cos \theta$$

Calcolo irraggiamento su superficie inclinata

$$\cos \theta$$

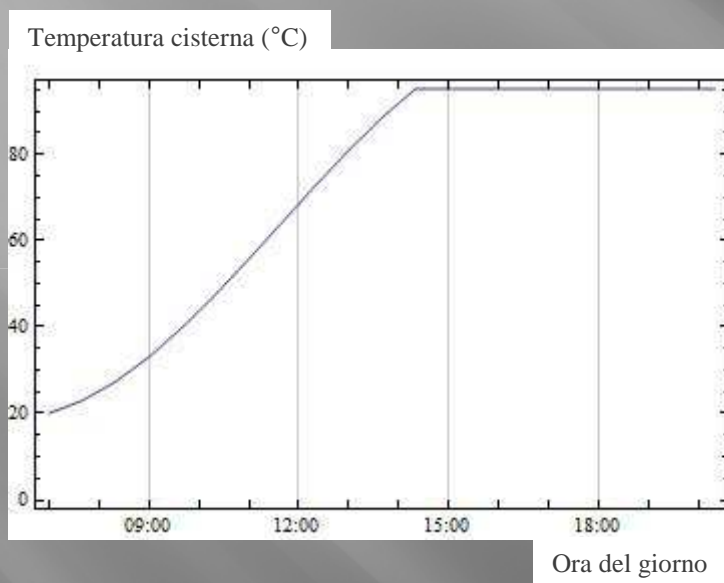
Fissata la posizione, l'inclinazione del pannello e il giorno in questione, l'angolo di incidenza diventa funzione della posizione del Sole nell'arco della giornata.



Andamento irraggiamento tra le 7.00 e le 21.00 del 23 Agosto 2011 su di un collettore piano a 30 gradi rispetto alla orizzontale, installato alla latitudine di Torino.

Riscaldamento cisterna

Nell'hp di perfetto isolamento termico, è possibile sfruttare l'irraggiamento appena calcolato per riscaldare l'acqua in entrata nel collettore; quest'acqua, scorrendo in una serpentina immersa nella cisterna, farà aumentare la temperatura di quest'ultima.



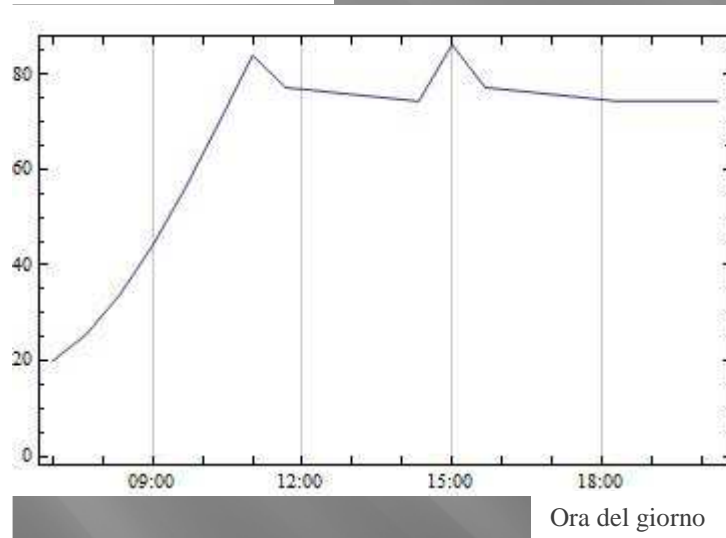
Una superficie di 6 metri quadri di collettori a lastra riesce a scaldare una cisterna di 280 l d'acqua fino a circa 95 °C.

Con la superficie di collettori selezionata, è già possibile alimentare la macchina di cui ho calcolato precedentemente il C.O.P, conoscendo la capacità refrigeratrice e le caratteristiche tecniche fornite dal costruttore ?

Alimentazione macchina

L'acqua scaldata dal pannello e accumulata nella cisterna viene inviata all'ingresso del generatore della macchina frigorifera, cui cede il calore Q_g necessario perché essa estragga il calore Q_e al fluido che si vuole raffreddare.

Temperatura cisterna (°C)



Con 10 metri quadri di collettori a disposizione, il funzionamento della macchina procede dalle ore 11 alle ore 18, garantendo la produzione di acqua fredda; il ciclo si interrompe per circa mezz'ora, tra le 14.30 e le 15.00, quando è necessario disinserire la macchina e lasciare che il pannello riporti l'acqua alla temperatura di funzionamento.

L'acqua raffreddata prodotta può essere fatta scorrere in serpentine integrate in un ambiente, creando l'effetto refrigerante voluto.

Solare termico o fotovoltaico

A parità di irraggiamento G sulla superficie captante e a parità di capacità refrigeratrice della macchina frigorifera alimentata con l'energia prodotta dalla superficie stessa, vale:

Collettore e Macchina Ass: $\eta_1 = \frac{Q_1}{GS_1} \longrightarrow C.O.P._{Abs} = \frac{Q_e}{Q_1} = \frac{Q_e}{\eta_1 GS_1}$

Pannello e Macchina Compr: $\eta_2 = \frac{E_2}{GS_2} \longrightarrow C.O.P._{Compr} = \frac{Q_e}{E_2} = \frac{Q_e}{\eta_2 GS_2}$

Dunque: $\frac{COP_{Abs}}{COP_{Compr}} = \frac{\eta_2 S_2}{\eta_1 S_1} \longrightarrow S_2 = \left(\frac{\eta_1}{\eta_2} \frac{COP_{Abs}}{COP_{Compr}} \right) S_1$

Valori medi tipici: $\eta_1 = 0.6$
 $\eta_2 = 0.15$
 $COP_{Abs} = 0.7$
 $COP_{Compr} = 4$

$\longrightarrow S_2 = 0.7 S_1 \longrightarrow S_2 < S_1$

La superficie di pannello fotovoltaico è inferiore a quella di collettore.

I costi delle due tecnologie sono tuttavia differenti:

- Prezzo Pannello > Prezzo Collettore;
- Prezzo Macchina Abs > Prezzo Macchina Compr.

E' dunque difficile valutare in generale quale delle due opportunità sia piu' conveniente, in particolare senza conoscere le caratteristiche dell'utenza.

Una possibile soluzione sarebbe quella di utilizzare una macchina ad adsorbimento, che ha un costo piu' elevato ma temperature guidanti inferiori rispetto ad una macchina ad assorbimento, raggiungibili con un'ampia superficie di collettori a bassa efficienza ma bassissimo costo ($\approx 20 \text{ €/m}^2$).

COP $\approx 0,6$

$T_{\text{generator}} : 72/65^{\circ}\text{C} (161/149^{\circ}\text{F})$

$T_{\text{evaporator}} : 18/15^{\circ}\text{C} (65/59^{\circ}\text{F})$

$T_{\text{condenser}} : 27/32^{\circ}\text{C} (81/90^{\circ}\text{F})$

Weight (7.5kW; 2 RT): 260 kg (573 lb)

Sortech ACS 08
7.5 kW nominal capacity



Conclusioni

Un impianto di refrigerazione solare presenta i seguenti vantaggi:

- la risposta è in fase con la domanda: quando maggiore è il bisogno di refrigerazione, maggiore è anche l'energia solare disponibile per alimentare il ciclo frigorifero;
- il refrigerante usato è acqua;
- ammortizzato il costo dell'impianto, il costo per la refrigerazione è quasi nullo (solo la manutenzione).

Gli svantaggi invece sono:

- COP sensibilmente più bassi di un condizionatore a compressore;
- Elevato costo iniziale dell'impianto (collettore-accumulatore-macchina):
2007: 5000-8000 €/kW → 2009: 3500-5000 €/kW → 2011: 2200-4500 €/kW

Per giustificare il costo dell'impianto si può immaginare un utilizzo anche nei mesi invernali per la produzione di acqua calda sanitaria o per integrazione del riscaldamento a pannelli radianti.

Grazie dell'attenzione

BIBLIOGRAFIA

- Soteris Kalogirou: “Solar Energy Engineering”, Elsevier.
- Gordon-Choon Ng: “Cool Thermodynamics”, Cambridge International Science Publishing.
- Eicker: “Solar Technologies for Buildings”, Wiley.
- Çengel: “Termodinamica e Trasmissione del Calore”, McGraw-Hill Libri Italia.
- Robotti: “Impieghi dell’Energia Solare”, Utet.