Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Realizzazione di una test facility per la caratterizzazione di heat pipe utilizzati per la realizzazione di pannelli solari del tipo a tubi evacuati

A. Mariani, N. Calabrese, L. Simonetti, A. Lattanzi

Report RdS/2010/215

REALIZZAZIONE DI UNA TEST FACILITY PER LA CARATTERIZZAZIONE DI HEAT PIPE UTILIZZATI PER LA REALIZZAZIONE DI PANNELLI SOLARI DEL TIPO A TUBI EVACUATI

A. Mariani, N. Calabrese, L. Simonetti, A. Lattanzi (ENEA)

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA
Area: Usi Finali
Tema: Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistita da fonti rinnovabili

Responsabile Tema: Nicolandrea Calabrese, ENEA

ACCORDO DI PROGRAMMA

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO - ENEA

AI SENSI DELL'ART. 3 COMMA 2 DEL DECRETO MINISTERIALE 23 MARZO 2006 PER LE

ATTIVITÀ DI RICERCA E SVILUPPO DI INTERESSE GENERALE

PER IL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE

PIANO ANNUALE DI REALIZZAZIONE

Tema di ricerca 5.4.1.3 "Sistemi di climatizzazione estiva ed invernale assistita da fonti rinnovabili"

AREA: USI FINALI

Sviluppo di componenti e impianti innovativi per la razionalizzazione dei consumi elettrici negli edifici con particolare riferimento al condizionamento estivo
Attivita' D: sviluppo di componenti innovativi – heat pipe

REALIZZAZIONE DI UNA TEST FACILITY PER LA CARATTERIZZAZIONE DI HEAT PIPE UTILIZZATI PER LA REALIZZAZIONE DI PANNELLI SOLARI DEL TIPO A TUBI EVACUATI

RAPPORTO FINALE DELL' ATTIVITÀ

Unità emittente: UTTEI-TERM

Classificazione:

Distribuzione: USO PUBBLICO

Data: 30 settembre 2010

Elaborato: Andrea Mariani, Nicolandrea Calabrese, Luca Simonetti, Alberto Lattanzi

Verificato: ……

Approvato: Gino Boccardi

INDICE

1. INTRODUZIONE 3

1.1 Obiettivo dell'Attività 4

1.2 Impianti di condizionamento ad Energia Solare 6

2. I COLLETTORI SOLARI 9

2.1 Collettori solari piani (FPC) 12

2.2 Collettori a tubi evacuati heat pipe (EHP) 15

2.2.1 Struttura collettore a tubi evacuati 16

2.2.2 Funzionamento del collettore 18

3. L'HEAT PIPE 21

3.1 Geometria dell'Heat pipe 22

3.2 Fattori Caratterizzanti un Heat pipe 22

4. IMPIANTO SPERIMENTALE TOSCA 24

4.1 Descrizione dell'Impianto 25

4.1.1 Sistema di acquisizione dati 34

4.2 Modalità realizzativa delle prove 34

4.3 Dati di input e risultati 35

5. CONCLUSIONI 37

6. RINGRAZIAMENTI 38

1. INTRODUZIONE

L'obiettivo finale del tema di ricerca è quello di riuscire a sfruttare, con il massimo rendimento ottenibile, l'energia che il sole GRATUITAMENTE ci mette a disposizione producendo acqua calda a temperature superiori ai 100 [°C]. Questo obiettivo lo si vuole raggiungere attraverso una tecnologia semplice, industrializzabile ed a basso costo per l'utente finale.

Abbiamo proprio bisogno delle ENERGIE RINNOVABILI?

Lo scorso anno (2009) il consumo di energia a livello mondiale è stato di circa 11 Gtep (leggasi miliardi di tonnellate equivalenti di petrolio). Qualcuno si sarà chiesto: quanto ha consumato fin qui l'umanità nella sua lunga storia? Il calcolo è facile. Indicativamente 300 Gtep di energia da fonti fossili ed altri 100 Gtep da fonti rinnovabili (energia idraulica, dal vento, da biomasse e muscolare). Di quei 300 Gtep ne abbiamo consumati circa 1/3 negli ultimi 10 anni e se continuiamo con questo andamento basteranno solo meno di altri 8 anni per altri 100 Gtep. Se immaginiamo il più grande lago italiano, il lago di Garda, e lo immaginiamo pieno di petrolio, per arrivare a 300 Gtep ci vogliono 6 (SEI!) laghi di Garda.

Il problema energetico presenta due questioni che concorrono a fornire una risposta alla domanda da cui siamo partiti. La prima è: quanti laghi di Garda di petrolio o, equivalentemente, di gas naturale e carbone sono ancora disponibili prima di arrivare all'esaurimento pratico delle risorse? E subito dopo: quanti laghi di Garda di petrolio od equivalenti si possono bruciare senza un irreversibile danno ambientale?

E' inutile nascondersi. Neanche il più scriteriato ottimista può dare risposte con leggerezza a due domande che delineano un avvenire minaccioso per le future generazioni (e in qualche caso anche per la presente).

Veniamo ora al contributo offertoci dalle energie rinnovabili. Una coincidenza del tutto casuale può stimolare la nostra immaginazione: **tutta quella energia che l'umanità ha consumato** in millenni di storia, ma soprattutto in pochi decenni di sviluppo esponenziale di popolazione, beni di consumo, disponibilità di risorse, **ci arriva dal Sole in un solo giorno**.

Questo non vuole assolutamente dire che il problema sia di facile soluzione. Tutta quell'energia si distribuisce su di un'enorme superficie. Come si dice tecnicamente, è una forma di energia diluita.

Per essere raccolta adeguatamente richiede l'ingegno della natura (pensate a come il mondo vegetale si è stupendamente attrezzato con la disposizione delle foglie o con un inseguitore solare come il girasole!) o l'ingegno dell'uomo. Che però, ad un certo punto, avendo scoperto la "potenza motrice del fuoco", ha progressivamente rinunciato ad applicarsi ad utilizzare al meglio la forza del vento o la benefica radiazione del sole.

La speranza nasce osservando come pochi anni di applicazione abbiano consentito progressi tanto rapidi da portare l'energia eolica a concorrere in molti casi con i migliori impianti tradizionali, a trasformare i raggi del Sole in energia termica ad alta temperatura per far funzionare i classici cicli termodinamici produttori di elettricità, o direttamente in energia elettrica. La ricerca delle celle solari si muove verso impieghi di materiale 100 volte minori, rispetto alle attuali celle, con la possibilità di sfruttare le più svariate superfici esistenti, dai tetti delle case, alle finestre, alle pensiline delle stazioni.

Non vi è qui lo spazio per dar conto di tutte le innovazioni che sono in corso di sviluppo. Altrettanto importanti sono le associazioni di idee di sistemi innovativi: pensate soltanto a pompe di calore azionate da moduli fotovoltaici che utilizzano come sorgente fredda proprio la quota di energia solare che le celle non sono in grado di trasformare in energia alettrica.

Bisogna crederci e lavorarci come diceva Thomas Alva Edison, il grande inventore, con 99% di perspiration (di fatica nella sperimentazione e realizzazione, di investimento nella ricerca) e 1% di inspiration (l'impiego di tutte le capacità dell'ingegno).

E' chiara quindi la risposta alla domanda iniziale…abbiamo bisogno più che mai delle energie rinnovabili.

1.1 Obiettivo dell'Attività

L'attività oggetto del tema di ricerca ha come obiettivo quello di progettare e sviluppare prototipi di componenti innovativi per diverse tipologie di impianti di Solar Cooling, nell'intento di portare un contributo significativo all'allargamento della diffusione di questo tipo di impianti ed al miglioramento delle efficienze dei singoli componenti.

Come abbiamo constatato soprattutto negli ultimi anni, la domanda di elettricità nel periodo estivo raggiunge picchi estremi per l'uso eccessivo dei tradizionali condizionatori d'aria, fino a causare talvolta dei black out della rete elettrica.

L'uso dell'energia solare per produrre il freddo diventa quindi un'opportunità vantaggiosa, come dimostrato dai numerosi progetti pilota realizzati anche in Europa, soprattutto in Germania e Spagna. L'utilizzo dell'energia solare per il raffrescamento degli edifici risulta essere un'ipotesi non priva di attrattive, anche perché il periodo che fa registrare la maggiore richiesta di condizionamento coincide proprio con i mesi durante i quali la radiazione solare è al massimo e le giornate sono più lunghe, figura 1:

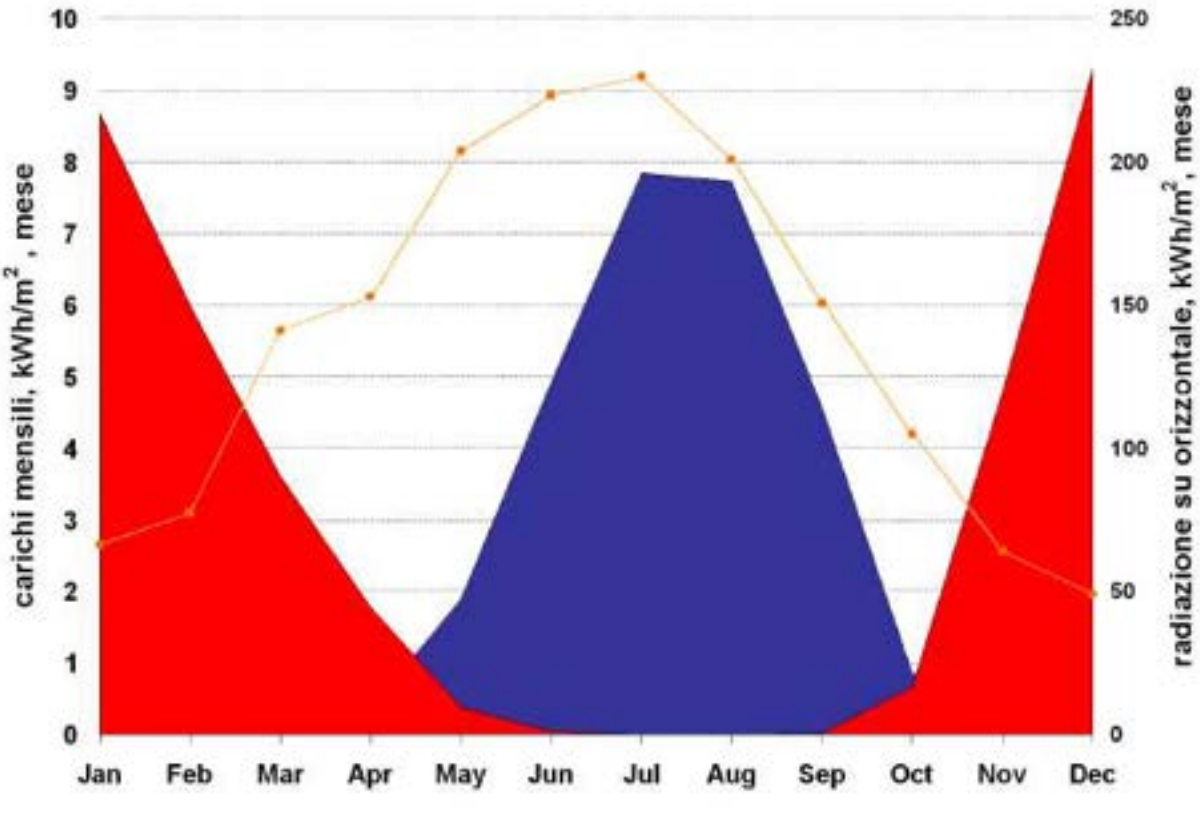


Fig. 1 - Andamento richiesta Energia Frigorifera

I sistemi di climatizzazione ad energia solare possiedono l'indubbio vantaggio di utilizzare fluidi di lavoro innocui, come l'acqua o le soluzioni saline. Sono rispettosi dell'ambiente, rispondono a criteri di efficienza energetica e possono essere usati, da soli o integrati ai sistemi di

condizionamento tradizionali, per migliorare la qualità dell'aria all'interno di qualsiasi tipo di edificio. Il loro principale obiettivo è quello di utilizzare tecnologie ad "emissione zero" per ridurre i consumi di energia nonché le emissioni di CO2.

In particolare, il componente oggetto di questa linea di ricerca è il **COLLETTORE SOLARE** che dovrà essere accoppiato ad una macchina ad assorbimento ad acqua/ammoniaca progettata per le basse temperature di attivazione (95-100°C).

1.2 Impianti di condizionamento ad Energia Solare

Il principio generale è la produzione di freddo a partire da una sorgente di calore. In sintesi i passaggi che descrivono la produzione sono, figura 2:

- la sorgente di calore "**sole**" irraggia energia che viene assorbita dai collettori solari;
- la produzione di freddo avviene per mezzo di macchine frigorifere che vengono alimentate con l'acqua calda prodotta dai collettori solari;
- il fluido freddo termovettore, acqua o aria, a seconda del tipo di macchina viene impiegato ai fini del condizionamento degli ambienti.

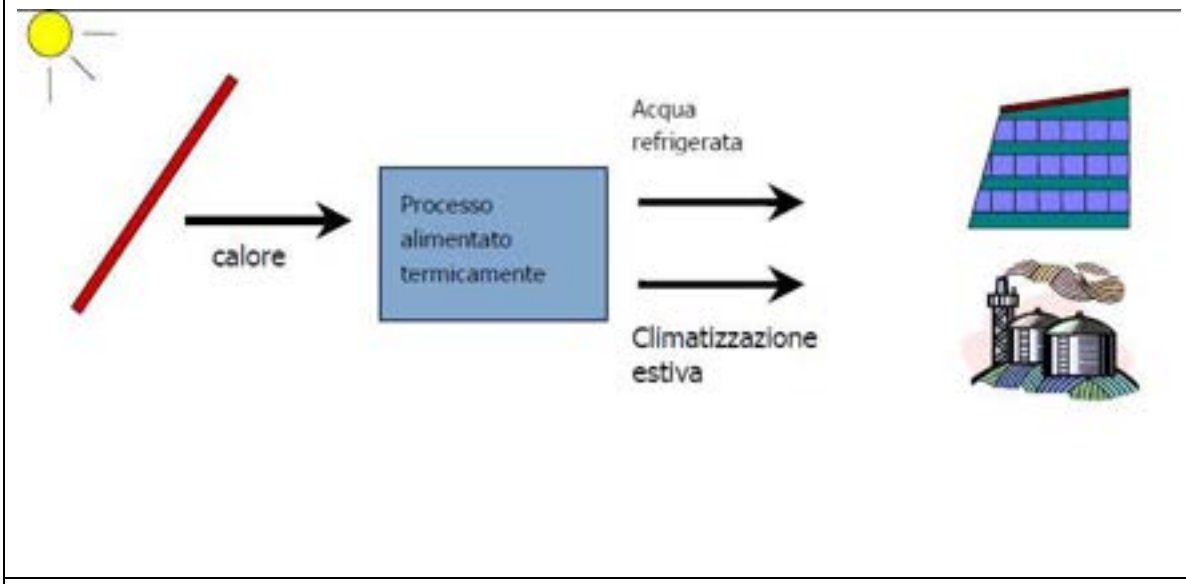


Fig. 2 - Principio di funzionamento per il condizionamento con sorgenti calde

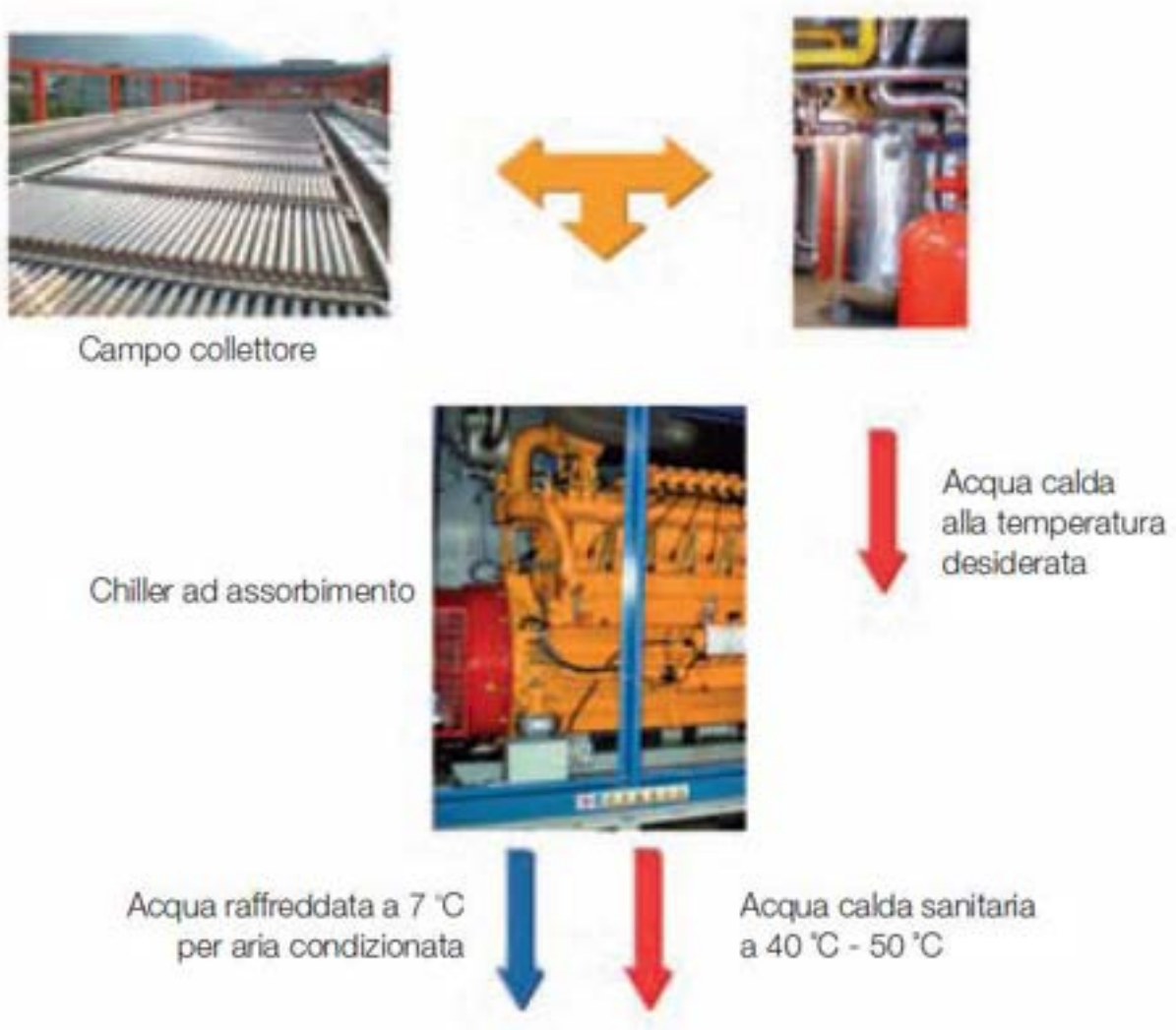


Fig. 2 - Principio di funzionamento per il condizionamento con sorgenti calde

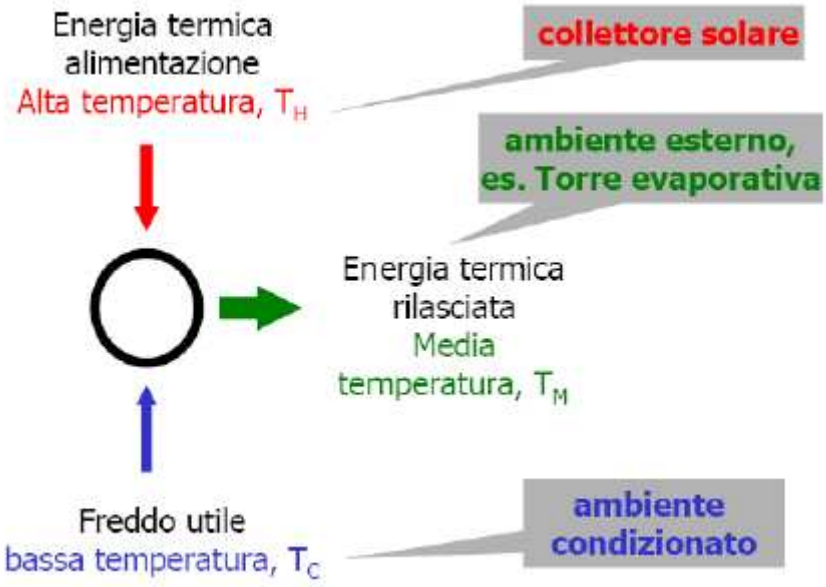


Fig. 2 - Principio di funzionamento per il condizionamento con sorgenti calde

2. I COLLETTORI SOLARI

I collettori o pannelli solari sono il cuore di un impianto solare termico: il loro scopo è infatti di trasformare la radiazione solare in energia termica tramite un fluido termovettore che attraversa il collettore stesso.

Il collettore solare termico (senza concentratori) è quindi un dispositivo in grado di "raccogliere" una frazione della potenza solare incidente trasformandola in potenza termica fornita ad un fluido termovettore, figura 3:

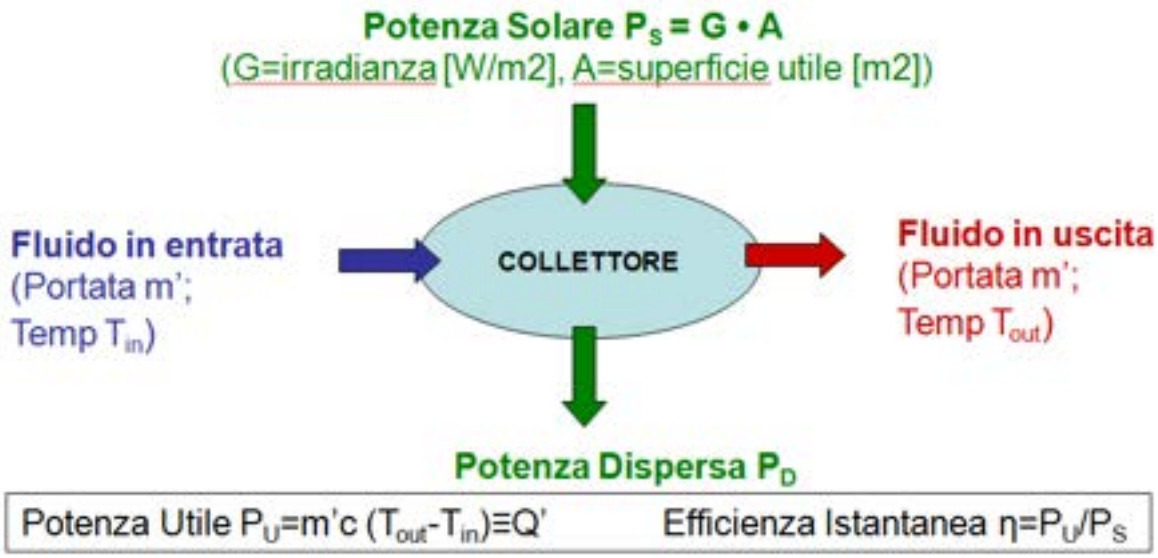


Fig. 3 – Potenza utile ed efficienza di un collettore solare

Ne esistono di diversi modelli con campi di applicabilità profondamente diversi, ma lo schema principale di funzionamento è pressoché lo stesso per tutti.

La parte principale è costituita da una piastra captante capace di massimizzare la quantità di radiazione solare assorbita trasformandola in calore. A stretto contatto con la piastra captante circola il fluido termovettore che raccoglie il calore prodotto per condurlo all'utilizzatore. Nelle sue linee principali un collettore solare non è molto diverso da un qualsiasi scambiatore di calore,

ma le necessità di isolamento e di massimizzazione di captazione lo rendono un oggetto molto particolare e variegato a seconda dell'uso necessario.

Per alimentare gli impianti di condizionamento ad energia solare esistono diverse tipologie di collettori solari sul mercato che si dividono in funzione della tipologia di collettore e della temperatura alla quale sono in grado di operare, figura 4 e 5:

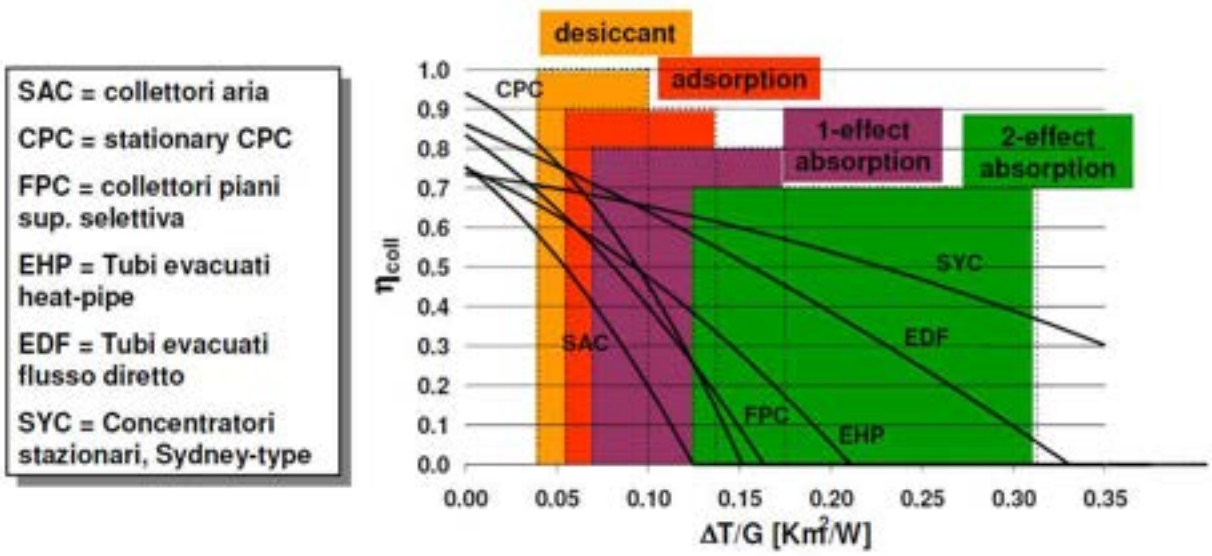


Fig.4 - Impiego dei collettori solari in funzione del tipo di macchina frigorifera

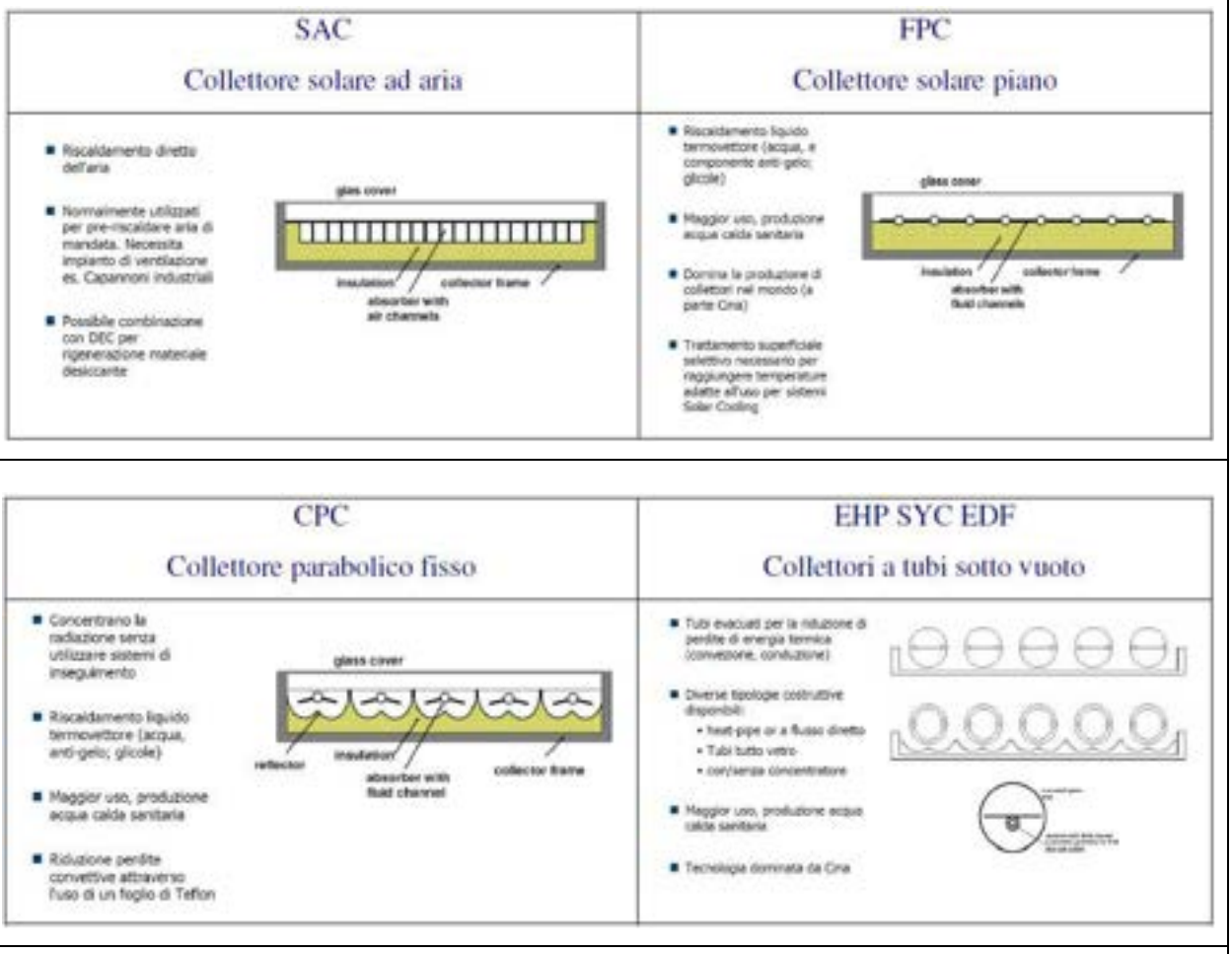


Fig. 5 - Tipologie collettori solari termici

I collettori solari da impiegare per gli impianti di condizionamento devono operare a temperature elevate; le macchine frigorifere cui sono collegati, infatti, possono solo funzionare se servite da temperature molto alte.

In particolare, una macchina frigorifera ad energia termica richiede una temperatura di funzionamento al vettore termico mediamente superiore agli 80 °C (ad assorbimento e ad adsorbimento).

I collettori solari piani standard possono trovare impiego limitatamente ai sistemi che operano secondo il ciclo del desiccant cooling (valore minimo di temperatura pari a circa 55 °C). Nelle configurazioni impiantistiche che utilizzano macchine frigorifere ad adsorbimento o ad

assorbimento a singolo effetto, l'impiego di collettori solari piani con superficie captante selettiva è limitato alle sole aree caratterizzate da valori molto elevati della radiazione solare.

Per le altre situazioni e per macchine frigorifere che richiedono un'elevata temperatura di funzionamento, devono essere previsti collettori solari ad alta efficienza (ad esempio, **collettori sotto vuoto**).

2.1 Collettori solari piani (FPC)

I collettori solari piani sono i principali pannelli stazionari, sono fra i primi ad essere stati realizzati e sono sicuramente i più utilizzati. Consentono di produrre acqua calda a temperature relativamente basse (dai 25 per collettori scoperti ai 70 °C per collettori con doppia copertura e vernici selettive):

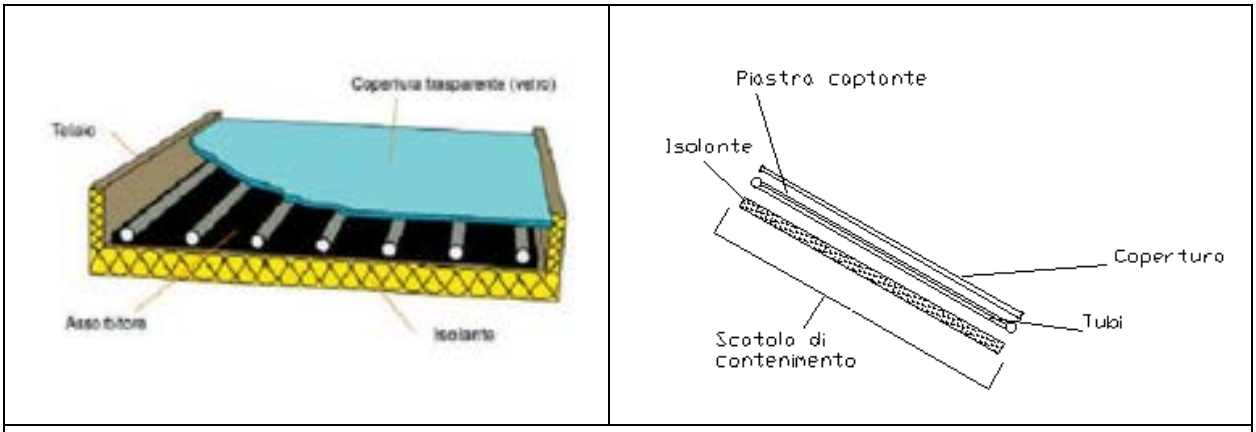


Fig.6 - Struttura di un collettore solare piano

La figura 6 mostra la struttura di un collettore piano. L'elemento principale è l'assorbitore, che ha la funzione di assorbire la radiazione solare incidente a onde corte e di trasformarla in calore (trasformazione fototermica).

Solitamente il collettore è composto da un metallo con buona capacità di condurre il calore (per esempio il rame) e dovrebbe riuscire a trasformare il più completamente possibile la radiazione

solare in calore. Possono essere impiegati assorbitori dotati di un cosiddetto strato selettivo, che determina un alto grado di assorbimento (a > 0,95) nel range delle lunghezza d'onda della radiazione solare e contemporaneamente irradiano poca energia, grazie a un basso fattore di emissività (e < 0,1) nelle lunghezze d'onda della radiazione termica. Gli strati selettivi possono essere ottenuti con procedimento galvanico (cromo, alluminio con pigmentazione al nickel) oppure applicati sotto vuoto.

Un buon contatto termico tra l'assorbitore e i tubi ove scorre il fluido termovettore in circolazione (per esempio acqua, glicole oppure aria) permette la cessione del calore al fluido termovettore e di conseguenza il trasporto fuori dal collettore del calore pronto per essere usato.

Per ridurre le dispersioni termiche e per migliorare il rendimento del collettore, l'assorbitore viene provvisto di una copertura trasparente frontale, mentre lateralmente e sul retro viene coibentato.

Gli elementi costitutivi principali sono:

- **COPERTURA:** si tratta di una piastra che copre frontalmente la piastra captante. Il suo scopo è quello di lasciar passare i raggi solari e di impedire la dispersione di calore nella stessa direzione. Le perdite di calore sono per conduzione, per irraggiamento e per convezione.

Le prime non sono quasi presenti frontalmente poiché non vi è contatto diretto fra la piastra captante e la copertura. Le perdite per irraggiamento sono impedite mediante la scelta di opportuni materiali per la copertura; il più usato è il vetro poiché presenta un'alta trasmettanza per le radiazioni nella frequenza del visibile (se vetro a basso contenuto di ferro circa 0,85-0,90 per radiazione ad incidenza normale) e contemporaneamente una bassa trasmettanza per le radiazioni nel campo dell'infrarosso emesse dalla piastra captante (approssimabile addirittura a zero). Sono usati anche materiali plastici, benché presentino peggiori caratteristiche nei confronti della radiazione infrarossa (la trasmettanza arriva a 0,40) e presentino il problema di degradare nel tempo per la permanenza ad alte temperature e per l'esposizione prolungata ai raggi ultravioletti; questo ne limita molto l'impiego. I vantaggi sono le caratteristiche meccaniche che ha la plastica nei confronti del vetro, infatti non teme rotture per sassi o altri oggetti urtanti, inoltre la possibilità di realizzare film sottili permette di limitare notevolmente la massa del pannello.

Le perdite di tipo convettivo sono le più pericolose. Infatti la piastra scalda l'aria a contatto generando spontaneamente moti convettivi. Il fenomeno è limitato mediante l'uso di una doppia copertura di vetro, in tale modo si crea un sottile strato di aria che fa da isolante; ovviamente in questo modo diminuisce la trasmettanza del materiale. Un altro modo è l'uso di coperture in policarbonato alveolare, questo materiale presenta al suo interno intercapedini di aria che non ne permettono il movimento e diminuiscono notevolmente queste perdite; lo svantaggio è che si tratta di materiale plastico.

- **PIASTRA CAPTANTE:** è il cuore del pannello; la sua funzione è quella di captare la massima radiazione solare e di trasformarla in calore, limitando al minimo le perdite dello stesso. È realizzata normalmente in rame o acciaio ed è trattata superficialmente con vernici scure e opache o addirittura selettive, per ottenere alta assorbanza nel campo del visibile e bassa emettanza per le alte lunghezze d'onda.

- **TUBI:** sono posti a stretto contatto con la piastra captante, talvolta addirittura saldati con essa, per ottenere il miglior scambio termico possibile. Normalmente sono realizzati in rame per l'ottima resistenza alla corrosione. Sono attraversati dal fluido termovettore che viene condotto allo scambiatore o all'accumulo a seconda dell'impianto.

- **ISOLANTE:** è usato per separare la piastra assorbente e i tubi dalla scatola di contenimento. Deve limitare essenzialmente le perdite per conduzione. È realizzato in materiali con struttura porosa, generalmente poliuretano, lana di poliestere, lana di vetro o lana di roccia. Per evitare l'umidità spesso è rivestito con un foglio di alluminio che ferma la condensa.

- **SCATOLA DI CONTENIMENTO:** raccoglie tutti i componenti del collettore conferendogli compattezza e resistenza meccanica, nonché protezione da sporco ed agenti atmosferici. È realizzata generalmente in acciaio inossidabile, alluminio anodizzato e, più raramente, in vetro resina.

- **FLUIDO TERMOVETTORE:** la sua funzione è quella di trasportare il calore dalla piastra captante all'utilizzatore. È necessario che abbia un'elevata densità per limitare le dimensioni dei tubi, un alto calore specifico e che non eserciti un'azione corrosiva sulle pareti dei tubi, deve essere inoltre stabile e chimicamente inerte per le temperature di utilizzo. Il fluido più economico che possiede tutte queste caratteristiche è l'acqua, con l'unico inconveniente di congelare a 0° C a pressione

atmosferica. Questo problema è ovviato con l'aggiunta di glicole etilenico o propilenico. In caso di sistemi aperti, cioè in cui il fluido passante nel pannello sia lo stesso utilizzato dall'utente, c'è bisogno di acqua senza aggiunte, con ovvi problemi di congelamento nei mesi invernali e nelle ore notturne. Altro problema dell'acqua è la durezza, per questo motivo l'acqua utilizzata è preventivamente trattata.

Esistono anche sistemi di questo tipo ad aria (collettori solari SAC): vengono utilizzati prevalentemente per riscaldamento degli ambienti, quasi mai per produrre acqua calda. Sono evidenti le differenze fra i fluidi termovettori acqua e aria. L'aria presenta un coefficiente di scambio termico e una capacità termica nettamente minori dell'acqua, è quindi necessario prevedere per questi pannelli superfici molto più ampie di scambio termico piastra captante – fluido termovettore. L'aria normalmente non è costretta attraverso dei tubi, bensì passa per feritoie ottenute fra la piastra captante e l'isolante.

2.2 Collettori a tubi evacuati heat pipe (EHP)

I collettori solari finora descritti hanno rendimenti estremamente ridotti in climi sfavorevoli, con scarsa insolazione e bassa temperatura, a causa delle eccessive perdite di calore. Poiché queste perdite sono dovute per lo più ad effetti convettivi, sono stati ideati dei pannelli nei quali l'intercapedine d'aria è sostituita da una zona sottovuoto (o meglio a bassissima pressione). Questo permette di ridurre drasticamente le perdite anche in zone a temperatura molto bassa.

Esistono fondamentalmente due tecnologie diverse per realizzare questi pannelli: nella prima lo scambio di calore è liquido-liquido come nei pannelli convenzionali, mentre la seconda prevede che il fluido che scorre nelle tubature del pannello evapori e ceda successivamente il calore per condensazione: quest'ultima è detta tecnologia ***heat-pipe***.

La tecnologia heat-pipe risulta più efficiente, ma è tecnologicamente più complessa. Per far evaporare il fluido a temperature inferiori ai 100°C è necessario depressurizzate le tubature che contengono il fluido termovettore. Il tipo di fluido termovettore da utilizzare sarà oggetto di ricerca in questa attività.

2.2.1 Struttura collettore a tubi evacuati

Un collettore solare del tipo a tubi evacuati si compone essenzialmente dei componenti di seguito descritti:

- **TUBI EVACUATI:** si tratta di tubi di vetro borosilicato sottovuoto. Viene creato un tubo in vetro a doppia parete dove all'interno dello stesso viene praticato il vuoto: il sigillo sottovuoto viene effettuato con una lega metallica speciale tramite termocompressione, figura 7 e 8;

- **ASSORBITORE:** è realizzato con un rivestimento ad alta selettività al nitruro di alluminio Al-N/Al ed alette di alluminio

- **SCAMBIATORE A CONDENSAZIONE (HEAT PIPE):** è un tubo in rame avente diametro esterno pari a 8 [mm]. All'interno del tubo viene praticato il vuoto prima che lo stesso venga riempito con una precisa quantità di fluido termovettore.

- **COLLETTORE:** è realizzato in rame ed il numero di attacchi è funzione della potenza termica per che il pannello dovrà essere in grado di garantire. L'heat pipe può essere a diretto contatto con il fluido che attraversa il collettore oppure può essere alloggiato in un tubo camicia solidale al collettore stesso, figura 9 e 10.

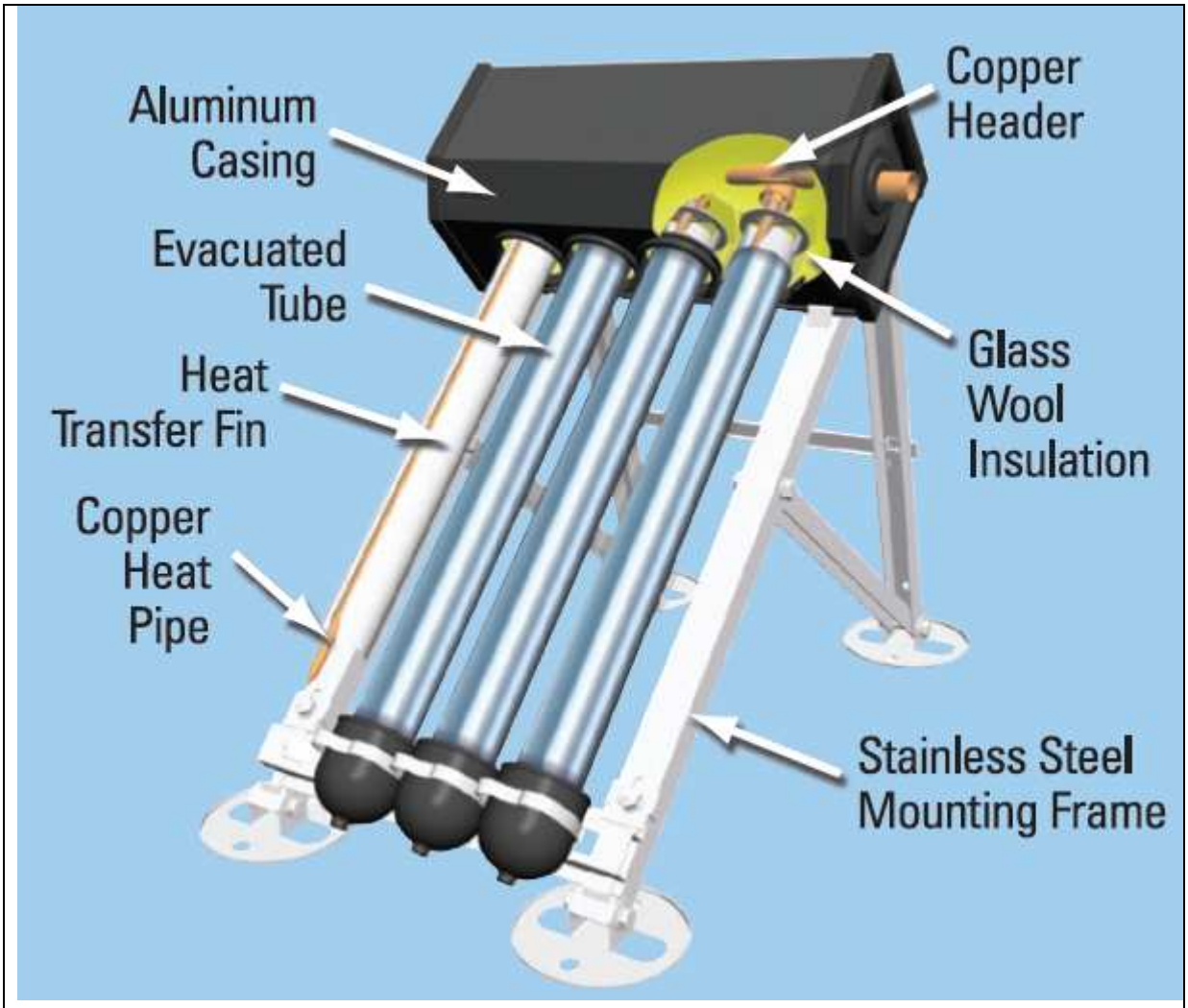


Fig. 7 - Struttura pannello solare a tubi evacuati

Fig. 8 - Tubi evacuati

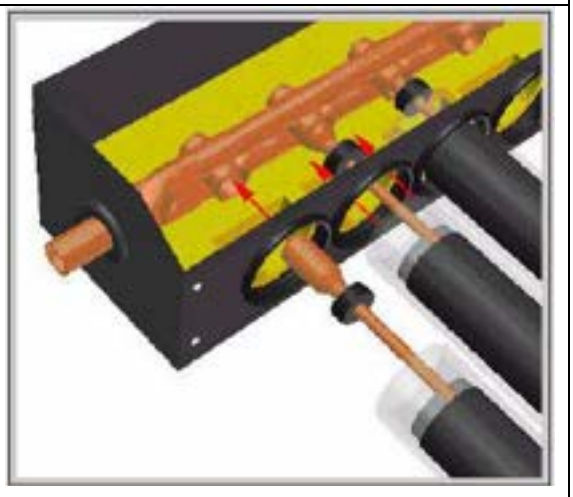


Fig. 9 - Accoppiamento heat pipe/collettore

Fig. 10 - Particolare montaggio tubi evacuati ed heat pipe al collettore

In ciascun tubo vetrato sottovuoto è presente un assorbitore e un tubo in rame (HEAT PIPE) in cui scorre il fluido termovettore. Il vuoto possiede ottime capacità di coibentazione eliminando completamente le perdite di calore per convezione, poiché l'aria non circonda la superficie captante (lo stesso principio secondo cui funziona il thermos) permettendo di ridurre quasi completamente le dispersioni. Nonostante la temperatura degli assorbitori raggiunga e superi i 120°C il tubo di vetro rimane freddo.

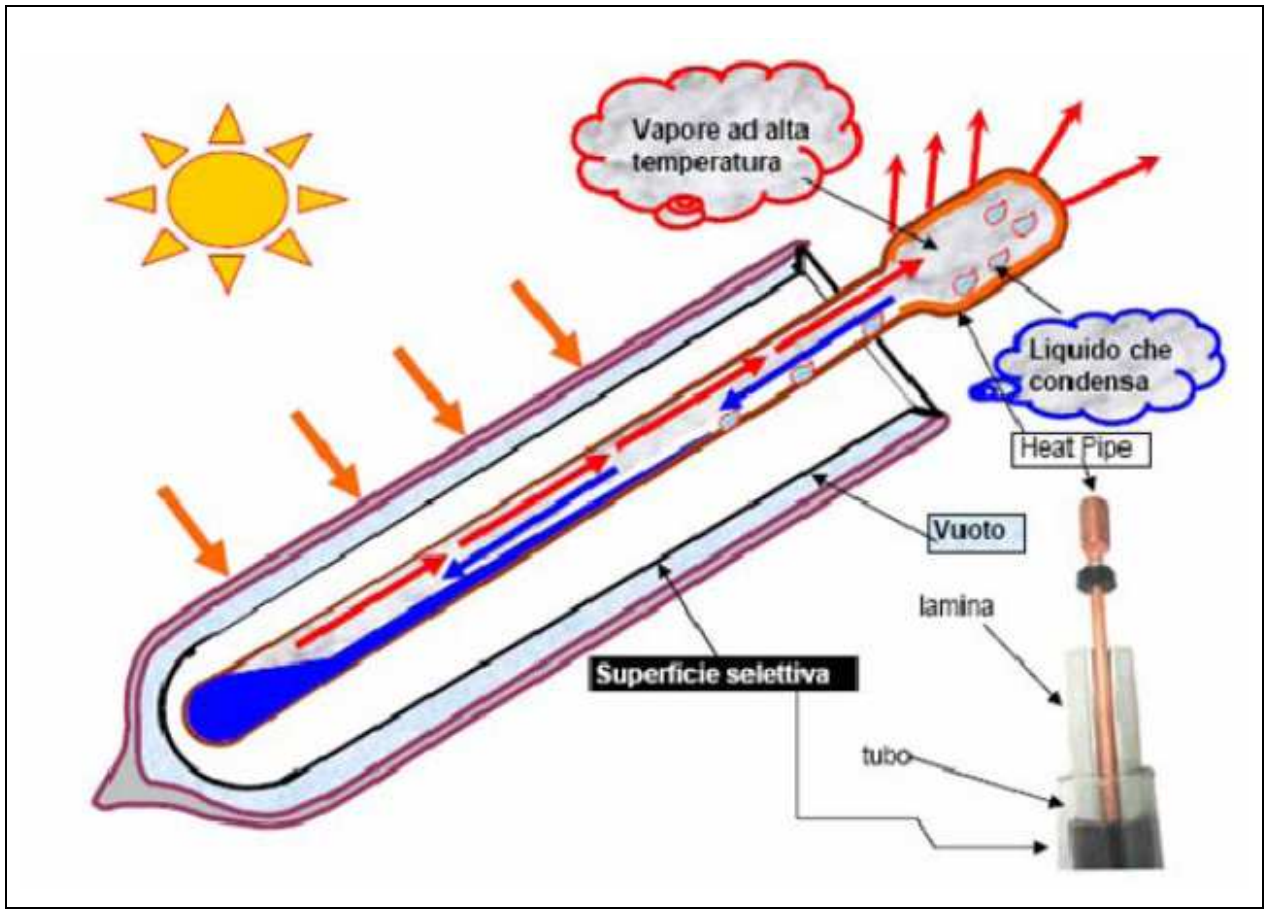
La possibilità di collegamento dei pannelli solari in serie e in parallelo apre la strada a molti nuovi campi di applicazione: in funzione del fabbisogno di acqua calda e del rendimento di punta richiesto si possono collegare in serie e in parallelo diversi collettori.

2.2.2 Funzionamento del collettore

I Collettori solari del tipo heat pipe utilizzano la radiazione solare per produrre acqua calda a mezzo di speciali tubi in vetro sottovuoto che convertono la radiazione solare in calore e lo trattengono grazie al vuoto creato al loro interno.

L'energia raccolta dal tubo in vetro viene trasferita sulla lamiera termoconduttrice presente all'interno e successivamente all'Heat-Pipe. L'elemento in rame Heat Pipe inserito all'interno del tubo permette al liquido contenuto al suo interno di evaporare anche a basse temperature.

Il tubo dei collettori heat-pipe è infatti riempito con un fluido che viene immesso all'interno dello stesso solo dopo aver praticato il vuoto: in questo modo il fluido evapora già a basse temperature. Il vapore che giunge al condensatore cede il calore prodotto al liquido che circola all'interno del collettore e condensando precipita nella parte inferiore per poi riprendere il processo di vaporizzazione. Lo scambio termico avviene "a secco", senza contatto diretto tra il fluido termovettore all'interno del tubo sottovuoto e l'acqua che circola all'interno del collettore, figura 11:



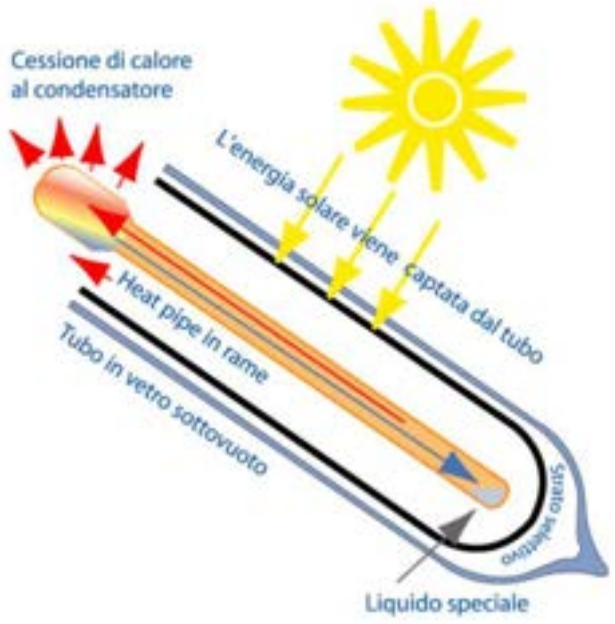


Fig. 11 - Modalità di funzionamento collettore ad heat pipe

3. L'HEAT PIPE

Il componente chiave dei pannelli solari del tipo a tubi evacuati è l'heat pipe che viene utilizzato per trasferire il calore del sole all'acqua di processo.

Il tubo a vuoto lavora con il principio "heat pipe" (tubo di calore): tale principio è la soluzione che ottiene il migliore risultato in termini di efficienza per il contatto diretto fra irradiazione solare trasporto e cessione del calore al fluido di raffreddamento. Un heat pipe è un dispositivo che trasferisce rapidamente calore da un punto ad un altro. Spesso viene denominato "superconduttore" di calore, in quanto è capace di trasferire calore senza alcuna dispersione.
Un heat pipe tipico, figura 12, si presenta come un tubo (cilindro cavo) costituito da metallo termoconduttore, ad esempio rame o alluminio sigillato alle estremità, e contenente una determinata quantità di fluido:

Figura 12 - Struttura tipica di un heat pipe

L'heat pipe è molto efficiente nel trasferire calore, molto più di un condotto di rame pieno con la stessa sezione. Sono stati registrati flussi di calore maggiori di 230 MW/m^2

Il fluido interno al tubo di calore viene riscaldato dall'assorbitore, vaporizza e sale per circolazione naturale al condensatore collocato in un collettore opportuno. Il fluido, raffreddandosi nel condensatore, cambia stato, da gassoso a liquido e scende di nuovo verso il basso. In questa maniera si ottiene il massimo rendimento sfruttando il calore latente di condensazione del vapore.

Il calore latente (associato a una trasformazione termodinamica) è la quantità di energia per unità di massa necessaria allo svolgimento di una transizione di fase (o passaggio di stato).

L' entalpia di vaporizzazione (anche detta comunemente di ebollizione) è una proprietà fisica di ogni sostanza. È definita come il calore richiesto per vaporizzare una mole di sostanza al suo punto di ebollizione a pressione standard (101.325 [Pa]).

L'entalpia di ebollizione o calore di vaporizzazione dell'acqua è di circa 2260 [kJ/kg] equivalente a 40.8 [kJ/mol]. Questo è molto elevato: cinque volte l'energia necessaria per scaldare l'acqua da 0 a 100 gradi Celsius.

3.1 Geometria dell'Heat pipe

L'heat pipe è realizzato in rame ed ha le seguenti caratteristiche geometriche:

Lunghezza [mm]:	1500
Diametro esterno [mm]:	8
Diametro interno [mm]:	6,5
Spessore tubo [mm]:	0,75

L'analisi della geometria dell'heat pipe non è oggetto di questa attività di ricerca poiché si ritiene che sia prioritario analizzare gli altri parametri che caratterizzano il comportamento termico degli heat pipe.

3.2 Fattori Caratterizzanti un Heat pipe

I fattori caratterizzanti il comportamento termico di un heat pipe sono:

- la geometria dell'heat pipe (diametro interno e lunghezza);

- il grado di vuoto praticato all'interno dell'heat pipe prima che venga riempito;

- il tipo di fluido con il quale viene effettuato il riempimento (es. acqua, olio di silicone, alcool,..)

- la quantità di fluido di riempimento immesso all'interno dell'heat pipe (grado di riempimento);

- l'inclinazione di installazione dell'heat pipe.

L'obiettivo è creare un legame tra questi parametri e le prestazioni richieste, in modo da poterne personalizzare la realizzazione in funzione della destinazione d'uso (es. produzione ACS, solar cooling) e della zona geografica dove l'heat pipe verrà installato. In generale, i risultati ottenuti mediante la sperimentazione dovranno consentire lo sviluppo di una piccola utility dedicata alla selezione dell'heat pipe che meglio soddisfa l'applicazione per la quale verrà utilizzato.

4. IMPIANTO SPERIMENTALE TOSCA

L'impianto sperimentale **TOSCA** ((**T**hermalfluid-dynamics **O**f **S**olar **C**ooling **A**pparatus) è stato progettato, realizzato e sviluppato presso il laboratorio di Termofluidodinamica Applicata ai Sistemi Energetici del C.R. Casaccia dell'ENEA.

Lo scopo principale dell'impianto **TOSCA** è lo studio dello scambio termico, ai fini di migliorare le prestazioni, di un heat pipe a tubo evacuato. Nella presente attività, l'heat pipe è riscaldato per effetto joule e raffreddato con un fluido (acqua) che scorre all'interno di un collettore in cui è inserita la parte condensante dell'heat pipe stesso. Lo scambio termico avviene, quindi, tra la superfice esterna dell'heat pipe ed il fluido che passa attraverso il collettore in convezione forzata senza cambiamento di fase, vedi figura 13:

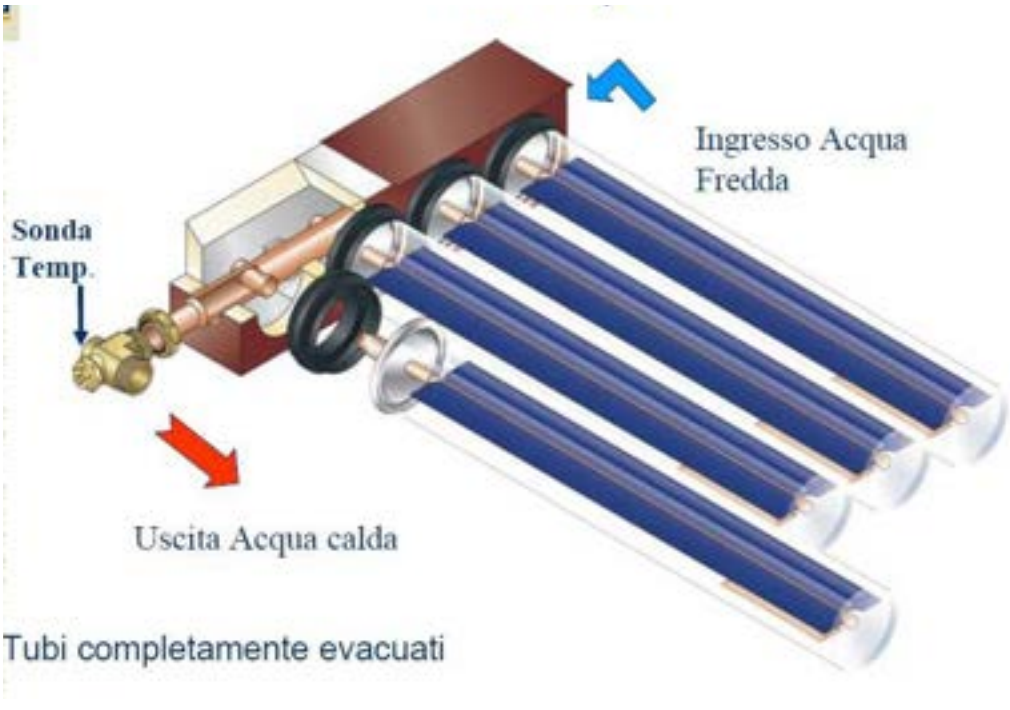


Fig. 13 - Logica di funzioamento collettore solare a circolazione forzata

L'Italia offre condizioni meteorologiche molto buone per l'uso dell'energia solare. Il valore di insolazione compreso tra 1200 e 1750 [kWh/m^2] all'anno presenta una differenza tra nord e sud intorno al 40%, rimanendo in entrambi i casi maggiore del fabbisogno annuo procapite di calore necessario per la preparazione di acqua calda nel residenziale. A queste condizioni un impianto solare standard consente di risparmiare fino all'80% dell'energia necessaria per la preparazione di

acqua calda e fino al 30% della domanda complessiva di calore per l'acqua calda sanitaria e per il riscaldamento degli ambienti. Condizioni tanto favorevoli e la disponibilità di una tecnologia affidabile ed efficace conferiscono all'Italia un alto potenziale economico e tecnico per il solare termico. Il know how maturato con i collettori progettati per la produzione di acqua calda per uso sanitario è alla base della progettazione di questi nuovi tipi di collettori "ad alta temperatura", necessari per l'utilizzo in impianti del tipo solar cooling. Lo scopo dell'attività è quello di individuare le temperature massimi ottenibili con questi tipi di collettori e di ben identificare i limiti di utilizzo degli stesso.

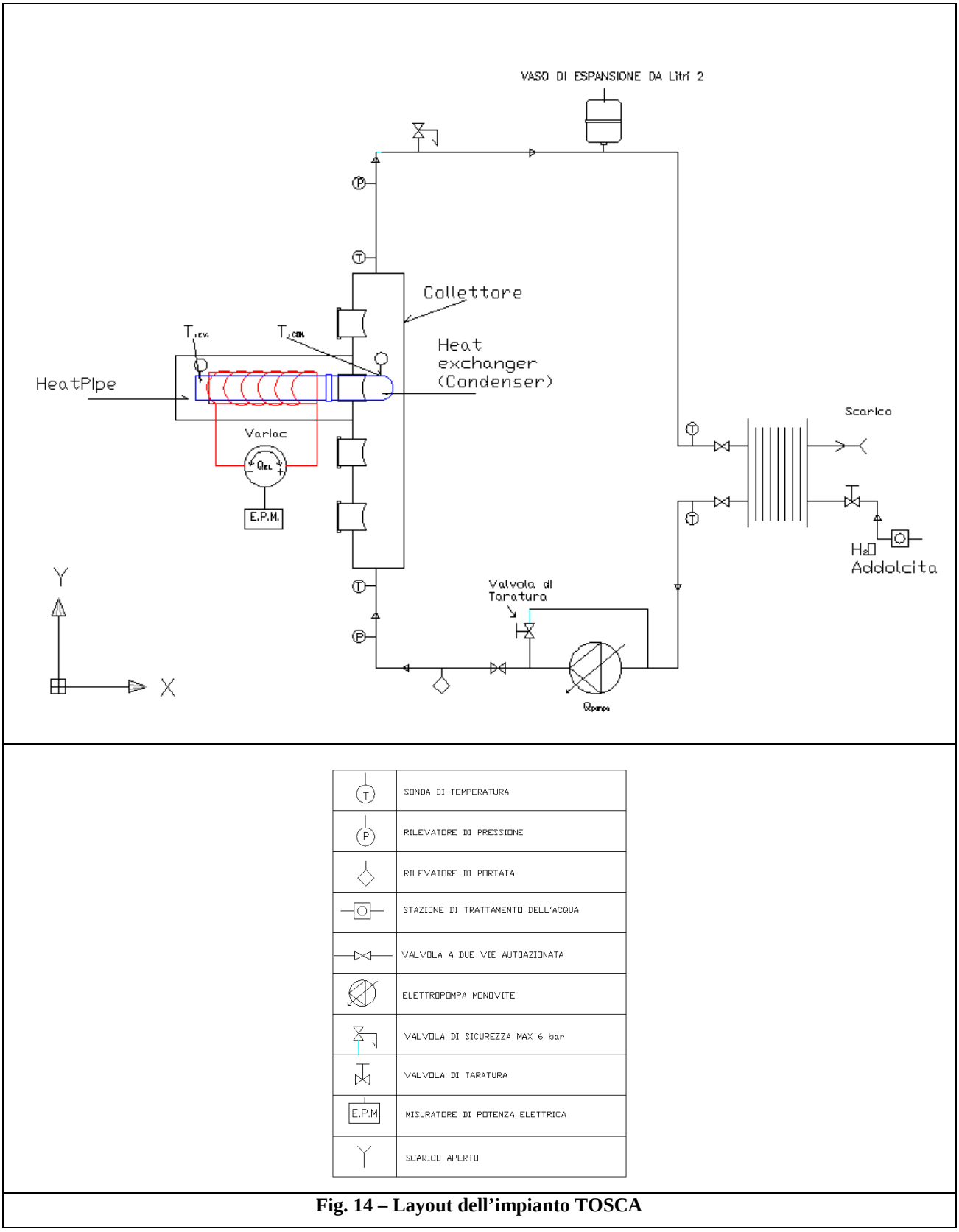
4.1 Descrizione dell'Impianto

Il layout dell'impianto **TOSCA** viene presentato in figura 14 mentre la figura 15 mostra una visione d'insieme dell'impianto.

La scelta del fluido di lavoro da utilizzare nella campagna sperimentale, nel ramo secondario, è ricaduta sull'acqua per la sua semplicità di utilizzo.

Nello schema di figura 14 si possono distinguere i vari componenti :

- Pompa eccentrica;
- Valvola di taratura;
- Filtro;
- Misuratore di portata;
- Sezione di prova (tubo di calore accoppiato al collettore);
- Valvola di sicurezza;
- Vaso d'espansione (polmone);
- Condensatore;
- Sistema di carico/scarico refrigerante (non visibile in figura).



T	SONDA DI TEMPERATURA
P	RILEVATORE DI PRESSIONE
	RILEVATORE DI PORTATA
	STAZIONE DI TRATTAMENTO DELL'ACQUA
	VALVOLA A DUE VIE AUTOAZIONATA
	ELETTROPOMPA MONOVITE
	VALVOLA DI SICUREZZA MAX 6 bar
	VALVOLA DI TARATURA
E.P.M.	MISURATORE DI POTENZA ELETTRICA
	SCARICO APERTO

Fig. 14 – Layout dell'impianto TOSCA

Fig. 15 - Visione d'insieme dell'impianto TOSCA

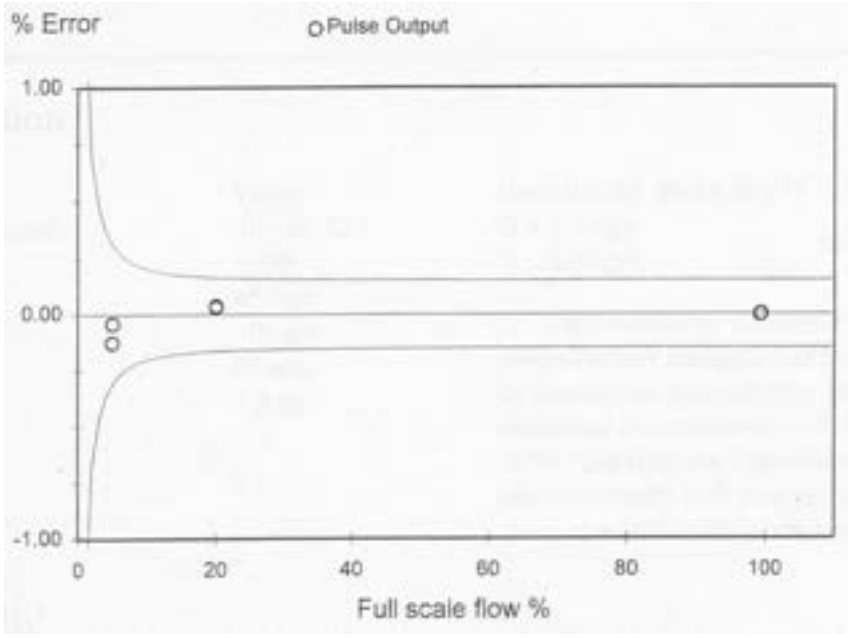
La pompa volumetrica utilizzata (vedi figura 16), Marca Seepex mod. MD 0015-24 / A6-A7-A7-H0-GA-X, è una pompa eccentrica progettata per sistemi in pressione sino a 6 bar. Il range delle prestazioni della testata adottata è di seguito riepilogato:

Performance data	Flow rate	Pressure	Speed	
	2,5 l/h	2 bar	68 rpm	min
	10 l/h	2 bar	271 rpm	max
Starting torque	2 Nm			
Max. power absorbed	0,02 kW			
Suction pressure	ass. ingolfato			
Discharge pressure	2 bar			

Figura 16 – Pompa eccentrica

Il flowmeter utilizzato (vedi figura 17) è un misuratore del tipo coriolì, Marca Danfoss, mod. MASSFLO type MASS 2100 DI 1.5. Di seguito si riporta il grafico per il calcolo dell'errore di misura dello strumento, in funzione della portata rilevata, figura 18:

Fig. 17 - Misuratore di portata



	5%		50%		100%	
	kg/h	(lb/h)	kg/h	(lb/h)	kg/h	(lb/h)
DI 1.5 (1/16")	1	(2.2)	32.5	(71.6)	65	(140)

Fig. 18 - Certificato calibrazione misuratore portata

La valvola di sicurezza inserita a valle della pompa è del tipo a molla a rilascio proporzionale (NUPRO-Swagelok R3A-E) tarata per un' apertura automatica a 6 bar (vedi figura 19).

Figura 19 – Valvola di sicurezza

Per poter variare la pressione in aspirazione nonché per stabilizzare la pressione all'interno del circuito di prova è stato inserito un vaso d'espansione (polmone Marca Elbi mod. D-2) della capacità di 2 litri, avente pressione di precarica pari a 3 bar e pressione massima d'esercizio pari a 8 bar (vedi figura 20). La pressione d'esercizio del circuito è di 3,5 bar, misurata tramite due trasduttori di pressione Marca DRUK LTD mod. EEXIA II CT4 type PTX-610I (P_{max}=10 bar) posti in ingresso ed in uscita del collettore (vedi figura 21).

Figura 20 - Polmone pressurizzatore

Figura 21 - Trasdutore di pressione

Il condensatore è del tipo a piastra realizzato dalla Alfa Laval, mod. AlfaNova 14-10H(A21,A21) (32870 5066 1, che permette di smaltire per intero tutto la potenza che il fluido può assorbire nel collettore (vedi Figura 22).

Figura 22 - Condensatore impianto secondario

Il salto termico che vogliamo si realizzi fra l'ingresso e l'uscita del collettore è di circa 10K, questo per permettere al sistema di essere accoppiato ad una pompa di calore ad assorbimento.

La sezione di prova si compone di due parti: l'heat pipe e il collettore con cui l'heat pipe si abbina al circuito secondario.

Come già detto l'heat pipe è costituito da un tubo di rame di diametro interno pari a 6,5 mm ed esterno pari a 8.0 mm lungo 1420 mm al cui interno è stato fatto il vuoto ed inserita una minima quantità di fluido. Il fluido si dispone in basso, ma quando viene riscaldato evapora ed il vapore così prodotto si trasferisce nella parte superiore del tubo che è inserita nel collettore. Una volta giunto nell'estremità superiore il fluido viene raffreddato cambiando nuovamente di stato e condensandosi. Una volta tornato allo stato liquido il fluido ricade per gravità verso il basso chiudendo il ciclo e innescando un sistema a circolazione naturale. In figura 23 riportiamo le due estremità del tubo di calore con particolare rilievo sulla chiusura per mantere il grado di vuoto all'interno del tubo stesso

Figura 23 - Particolare delle chiusure all'estremità dell'heat pipe

Il tubo di calore viene riscaldato tramite un riscaldatore a filo isolato avvolto su di esso. Il filo usato ha una lunghezza tale che ricopre quasi per intero la superficie esterno del tubo di rame. In questo modo possiamo simulare il comportamento dell'heat pipe sottoposto a radiazione solare con un flusso di calore uniforme sulla superficie esposta al sole. Il riscaldatore viene riscaldato per effetto Joule, il suo isolamento consente di non avere dispersioni di corrente nel circuito; inoltre la possibilità di usare un VARIAC in grado di fornire una tensione alternata variabile con continuità da zero alla tensione di rete consente di modulare la potenza erogata del dispositivo riscaldante e simulare le varie fasi della giornata con la radiazione solare che varia durante l'arco del ciclo solare quotidiano.

L'heat pipe, come il resto dell'impianto, è stato strumentato con termocoppie di tipo CR/AL tipo K con diametro 0,5 mm e giunto caldo isolato. Le termocoppie a servizio dell'heat pipe sono due, la prima posta nella zona evaporatore, l'altra nella zona condensatore: questo per permettere la visione immediata del comportamento termico e di individuare immediatamente l'innesco del suo funzionamento come tubo di calore. Il tubo in rame è stato quindi rivestito di un materiale isolante termico per limitare le perdite di calore verso l'ambiente circostante. Per dare una valutazione di massima di queste perdite una ulteriore termocoppia è stata posta all'esterno dello strato isolante: così è molto semplice calcolare le dispersioni termiche in ambiente.

Il collettore è posizionato orizzontalmente ed è penetrato dall'heat pipe con la sua parte condensante. Anche il collettore è isolato termicamente tramite una coibentazione per evitare dannose dispersioni in ambiente del calore. All'interno del collettore scorre l'acqua del circuito secondario che, raffreddando la zona condensante del tubo di calore, si scalda a sua volta. Conoscendo la portata di fluido tramite il trasmettitore danfoss ad effetto coriolì posto a monte del collettore e misurando le due temperature dell'acqua in ingresso ed in uscita al collettore, siamo in grado di effettuare un bilancio termico e conoscere la potenza asportata del fluido secondario. Nella scelta delle due termocoppie per la misura delle due temperature di ingresso ed uscita è stata posta particolare cura nella loro taratura: in particolare si sono scelte due termocoppie con la stessa legge di taratura per essere certi che la loro differenza (ΔT) non venga affetta da un errore dovuto alla conversione della misura.

4.1.1 Sistema di acquisizione dati

Per l'acquisizione dei dati si è utilizzato hardware della National Instruments. In particolare per il condizionamento dei segnali si è usato uno chassis SCXI-1000, in grado di contenere fino a 4 moduli per trattamento e condizionamento di segnali; i moduli installati a bordo dello chassis sono: un SCXI-1102B per misure di tensione (pressioni, portate e potenza); un SCXI-1102 per misure di temperatura. Tutto l'hardware SCXI colloquia con un PC dotato di una scheda di acquisizione National Instruments PCI-MIO-16XE-50.

Tutto il sistema è gestito da un programma scritto con LabVIEW 7.1, integrato con le librerie (DLL) del software NIST RefProp 8.0, contenenti le proprietà fisiche dell'acqua.

4.2 Modalità realizzativa delle prove

Per poter caratterizzare l'heat pipe, si è deciso di realizzare un banco di prova come di seguito descritto:

1) Per mezzo di una resistenza elettrica, distribuita lungo tutto l'heat pipe, a meno della parte finale dove avverrà la condensazione, verrà ceduta una potenza NOTA e VARIABILE all'heat pipe (Pel [W]);

2) Il condensatore verrà immerso in una tubazione attraversata da acqua avente portata e temperatura in ingresso note (QH2O [l/s] ; Tin [°C]) . In questo modo verrà asportato calore dal condensatore e sarà possibile, misurando la temperatura a valle dello scambio con l'heat pipe (Tout [°C]) e conoscendo portata e temperatura a monte dello stesso (QH2O [l/s] ; Tin [°C]), verificare la potenza termica asportata che dovrà essere prossima alla potenza elettrica fornita;

3) Al condensatore ed all'evaporatore sono previste delle sonde a contatto di temperatura, in modo da poter rilevare l'andamento della temperatura nel tempo. E' prevista anche una sonda a contatto installata sulla coibentazione del collettore, in modo da poter valutare le perdite di calore attraverso la coibentazione stessa;

4) La resistenza termica dell'heat pipe verrà calcolata come segue:

RT = [(Tevaporatore – Tcondensatore)/Pel] = [°C/W]

4.3 Dati di input e risultati

Di seguito si riportano delle videate del programma di acquisizione che mettono in evidenza come si presentano all'utente le grandezze rilevate, figure 24 e 25:

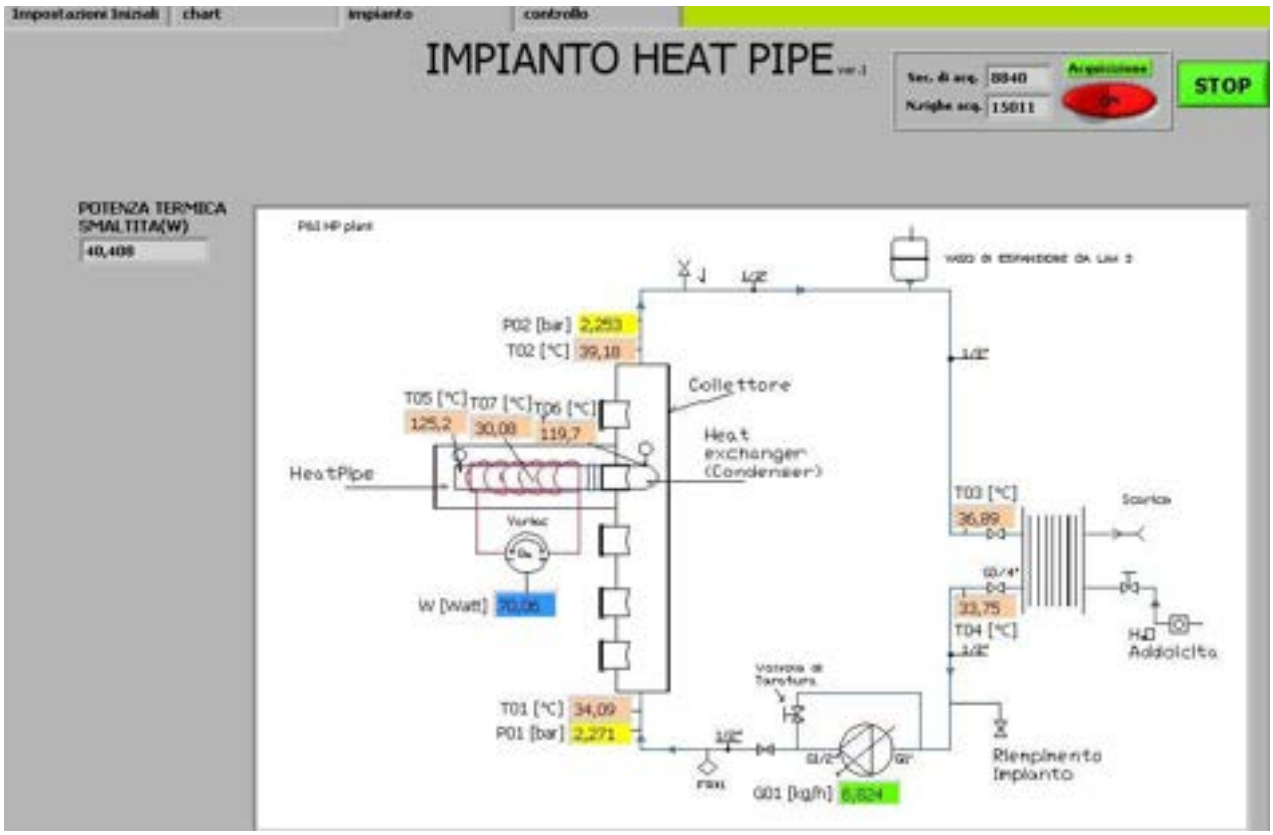


Figura 24 - Particolare valori numerici grandezze rilevate

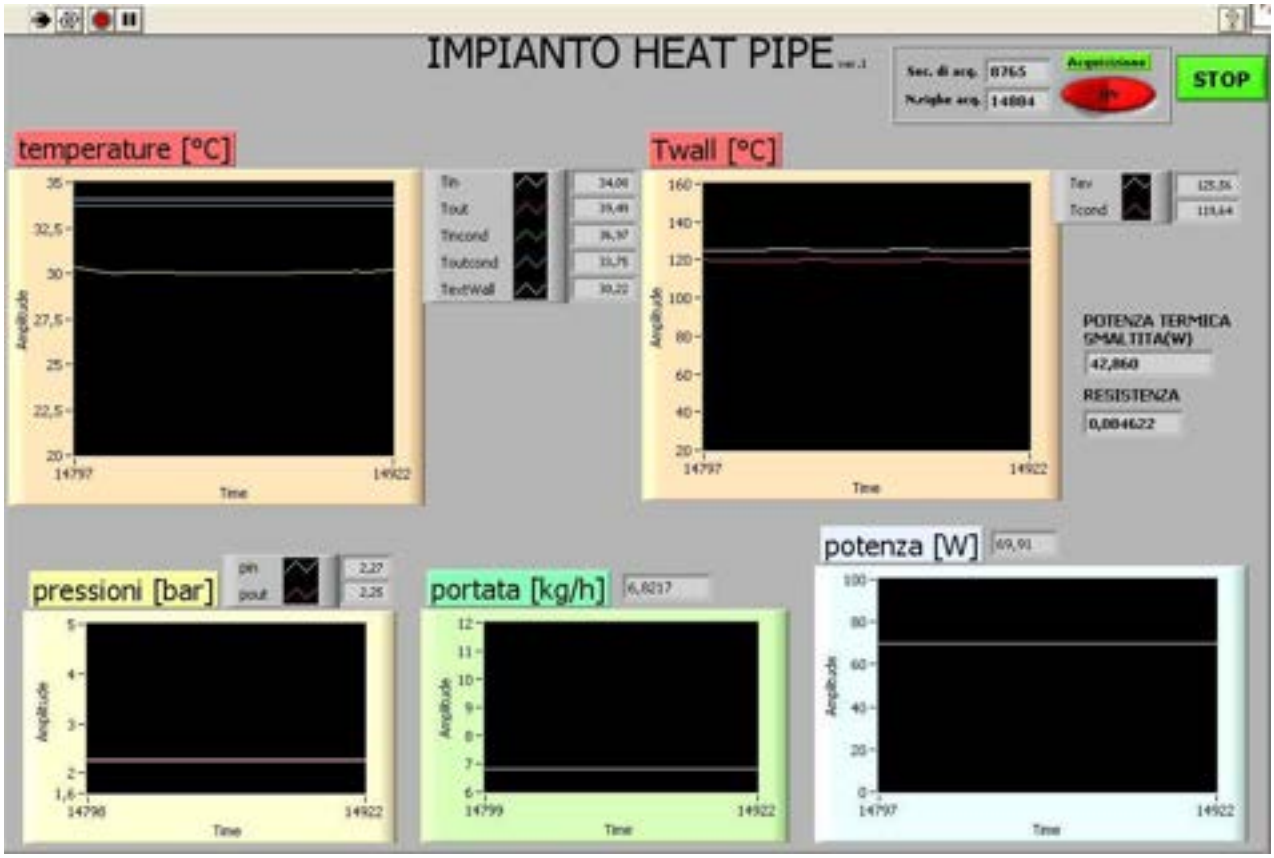


Figura 25 - Particolare valori numerici e grafici grandezze rilevate

I dati acquisiti vengono salvati su un file e sono gestibili tramite un comune foglio di calcolo.

L'impianto è stato collaudato e testato e sono state effettuate delle prime prove preliminari. Per migliorare le prestazioni è stata modificata la geometria del collettore e la posizione delle termocoppie per la misura della temperatura dell'acqua del circuito secondario in ingresso ed in uscita dal collettore stesso. Sono state ripetute quindi le prove preliminari provando anche a variare l'heat pipe usando così due diverse quantità di fluido di riempimento all'interno del tubo evacuato sottovuoto.

I primi risultati, suscettibili di una analisi molto più approfondita, evidenziano un comportamento differente nei due casi, evidenziando l'importanza del riempimento dell'heat pipe ai fini del suo buon funzionamento.

5. CONCLUSIONI

In questo primo anno di attività, come previsto, è stato progettato e realizzato l'impianto per la prova degli heat pipe. A seguito di ciò è stato testato l'impianto stesso ed a seguito di alcune problematiche l'impianto stesso è stato modificato nella geometria del collettore. A questo punto l'impianto è pronto per iniziare la campagna sperimentale.

Alcune prove preliminari sono già state effettuate per verificare il buon funzionamento dell'impianto.

La potenza fornita all'heat pipe ha un suo peso nella funzionalità del sistema, ma tutto ciò è ovvio. Chiaramente una potenza maggiore fornita al sistema porta ad avere delle temperature sulla superficie dell'heat pipe maggiori. Tutti i risultati in questo momento sono però congruenti ed compatibili con le più elementari nozioni di termofluidodinamica. Come già detto è ancora presto per trarre delle conclusioni definitive, ma bisognerà effettuare una analisi molto più approfondita a valle della intera campagna sperimentale

A valle di ciò è stato sostituito l'heat pipe per effettuare altre prove usando un secondo heat pipe con una quantità di fluido di riempimento molto differente dal precedente. In questa maniera si può valutare l'importanza di tale parametro nel funzionamento dell'intero sistema. Pur rendendosi necessarie ulteriori prove, si può già affermare che la quantità di fluido di riempimento influenza molto la funzionalità dell'heat pipe. Naturalmente si dovrà effettuare una campagna di prove specifica per trovare quale è la ricetta ideale.

6. RINGRAZIAMENTI

L'introduzione è pubblicata sul numero di Giugno 2010 dell'Aicarr journal ed è stata redatta dal Presidente dell'Aicarr, Renato M. Lazzarin.

L'associazione AICARR dal 1960 crea e diffonde cultura tecnico-scientifica per il migliore benessere ambientale. Nel terzo millennio l'Associazione si propone un obiettivo ancora più ambizioso: il benessere sostenibile, la sfida di una maggiore qualità dell'ambiente a costi energetici minori.

Per perseguire questo traguardo AICARR si occuperà sempre più:

- della migliore progettazione degli edifici e degli impianti;
- del progresso e della diffusione delle norme tecniche a livello nazionale ed internazionale;
- dell'innovazione delle tecnologie impiantistiche;
- della manutenzione delle infrastrutture energetiche ed in generale degli impianti;
- della riqualificazione energetica degli edifici esistenti;
- dell'uso consapevole delle risorse naturali e del ricorso alle fonti rinnovabili.

L'impegno è quello di realizzare un nuovo equilibrio sostenibile fra uomo e ambiente in tutti gli spazi di abitazione, lavoro, svago. L'Associazione è di tipo culturale e non persegue quindi obiettivi di profitto economico, mirando da questo punto di vista al solo pareggio di bilancio.