



Mostra Convegno sulle Fonti Rinnovabili
e l'Efficienza Energetica nel Mediterraneo
*Conference Exhibition on Renewable Sources
and Energy Efficiency in the Mediterranean*

Convegno "Solar Cooling: il condizionamento solare", Napoli 23 marzo 2012

Macchine frigorifere e pompe di calore ad attivazione termica, sistemi Desiccant Cooling

Prof. Maurizio Sasso
Tecnologie delle Fonti Rinnovabili



Università degli Studi del Sannio
Corso di Laurea in Ingegneria Energetica
Dipartimento di Ingegneria





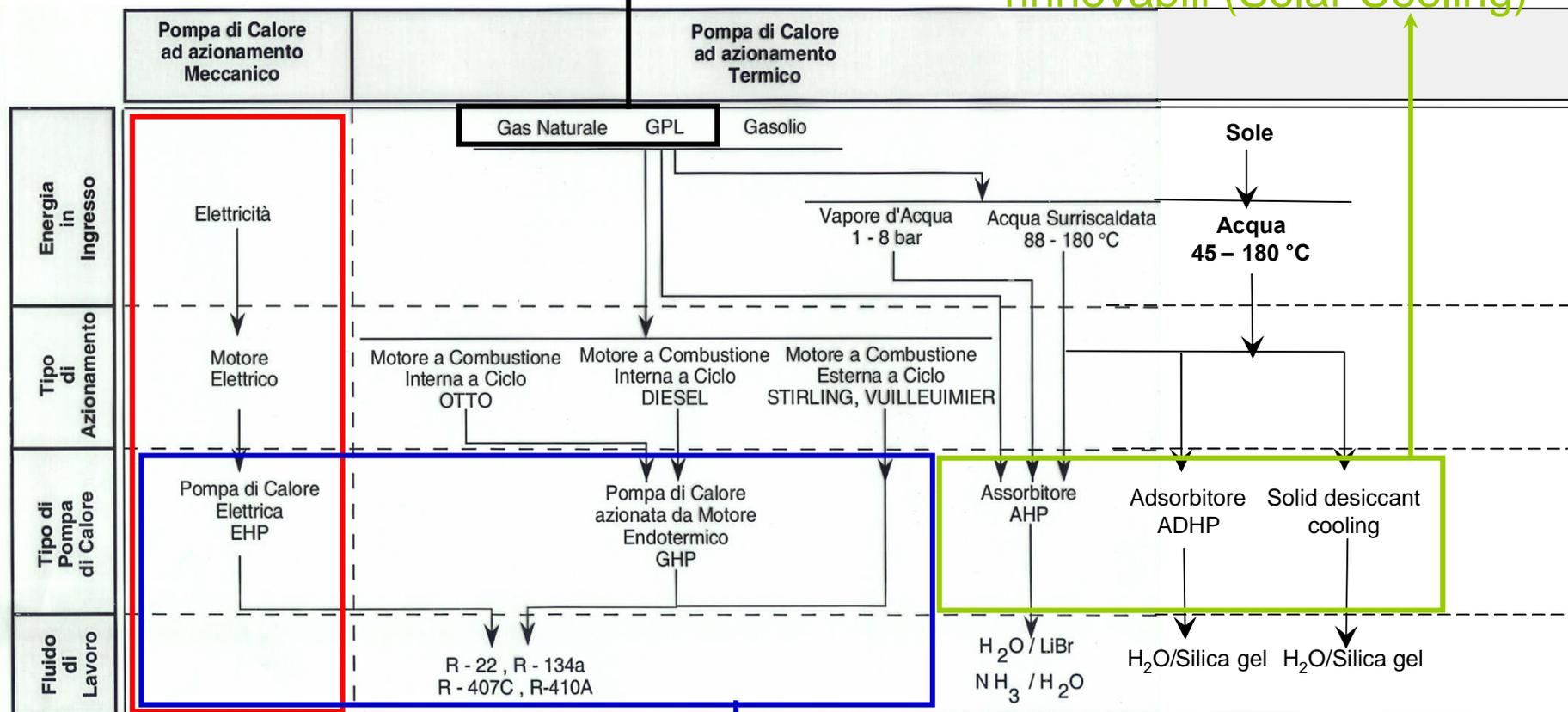
SCHEMA DELLA PRESENTAZIONE

- Introduzione
- Motivi che giustificano l'interesse verso la refrigerazione ad attivazione termica
- Tecnologie
- Conclusioni

CLASSIFICAZIONE POMPE DI CALORE

Possono sfruttare combustibili fossili
convenzionali o fonti energetiche
rinnovabili (Solar Cooling)

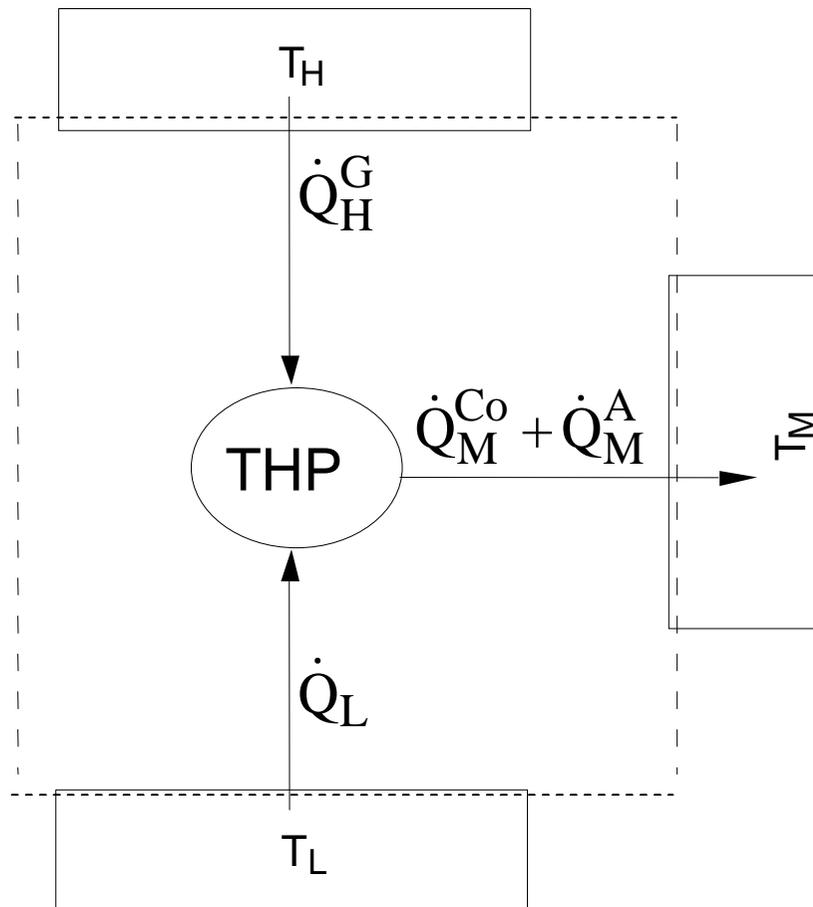
Gas Cooling technologies



Le pompe di calore elettriche sono le più diffuse (circa 90%) e con il minor costo d'acquisto

Sia nelle EHP che nelle GHP il fluido di lavoro evolve secondo un ciclo inverso a compressione di vapore

■ SISTEMA TERMODINAMICO TRITERMO



Queste macchine interagiscono con almeno tre SET:

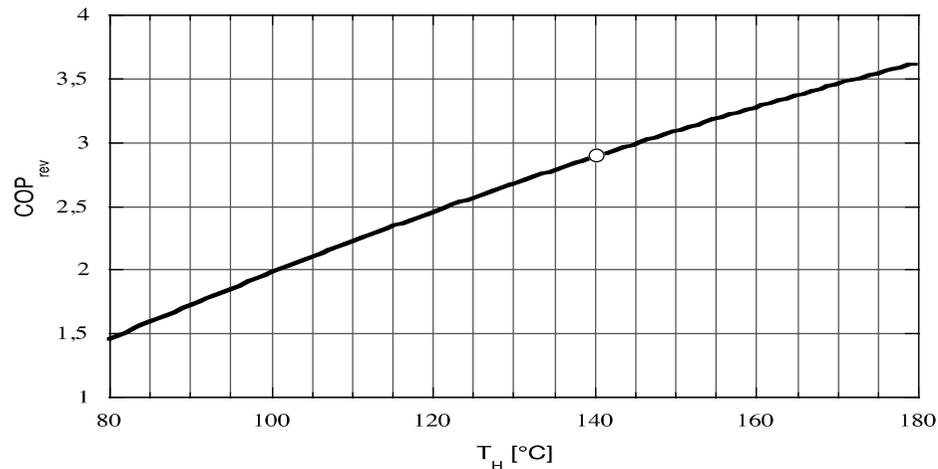
- ad elevata temperatura che fornisce l'energia termica richiesta (processo di combustione, reflui termici processi o motori, energia di derivazione solare);

- a temperatura intermedia coincidente con l'ambiente esterno;

- a bassa temperatura da cui si sottrae la desiderata energia di raffreddamento.

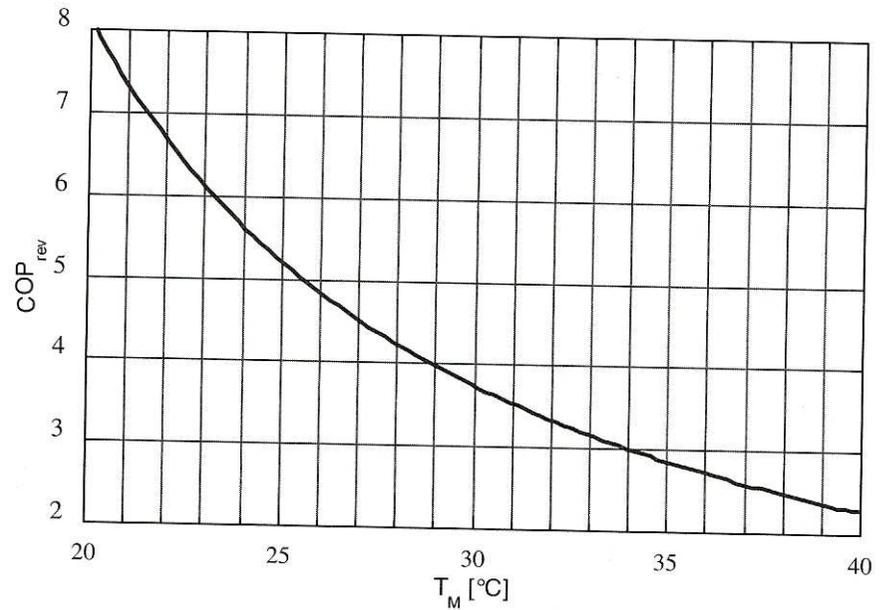


INFLUENZA TEMPERATURE SUL COP (Q_L/Q_H) MACCHINA IDEALE

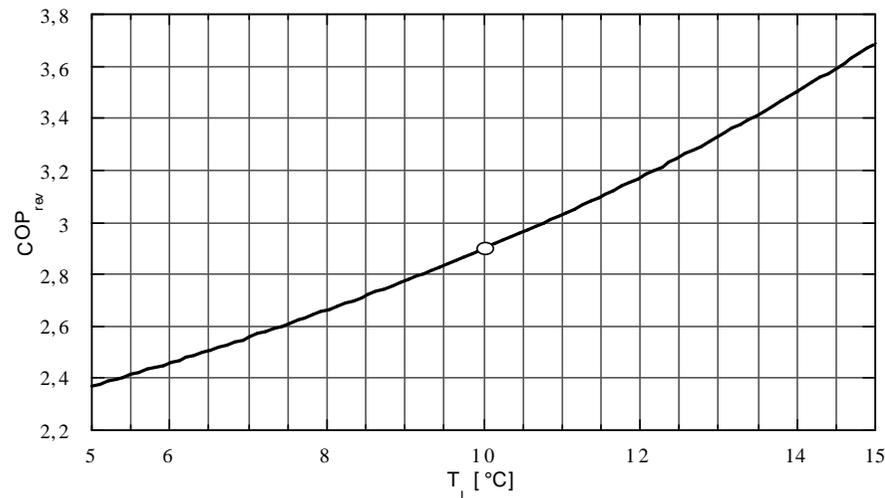


← cresce con T_H
(scelta collettori solari)

decrece con T_M
(condensazione ad acqua anziché ad aria, torri evaporative)

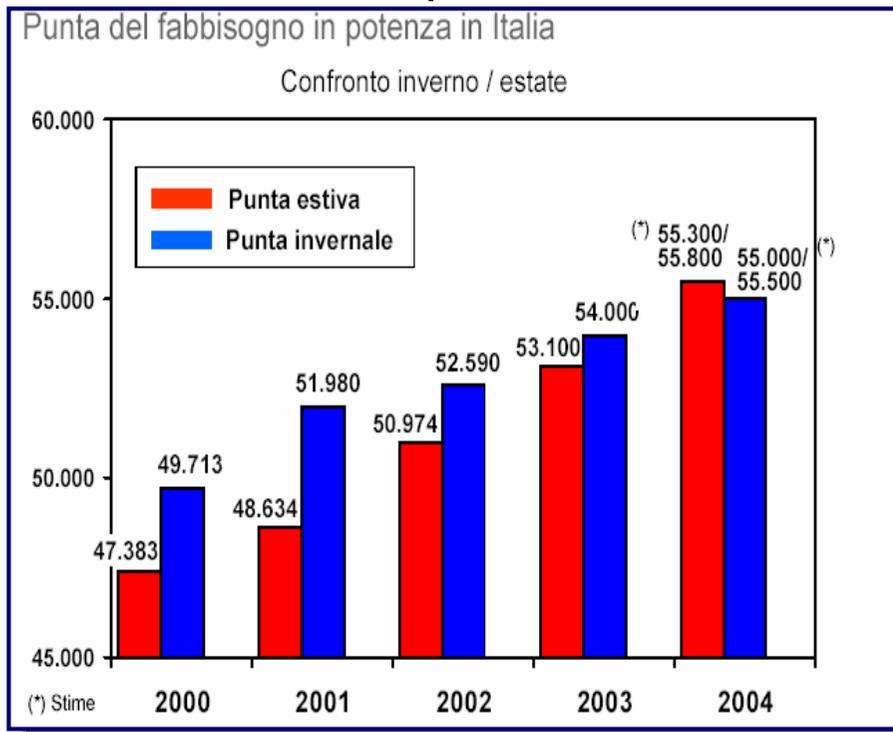


← cresce con T_L
(vincolo esigenze utenza da raffreddare, problemi per deumidificazione o reti estese)

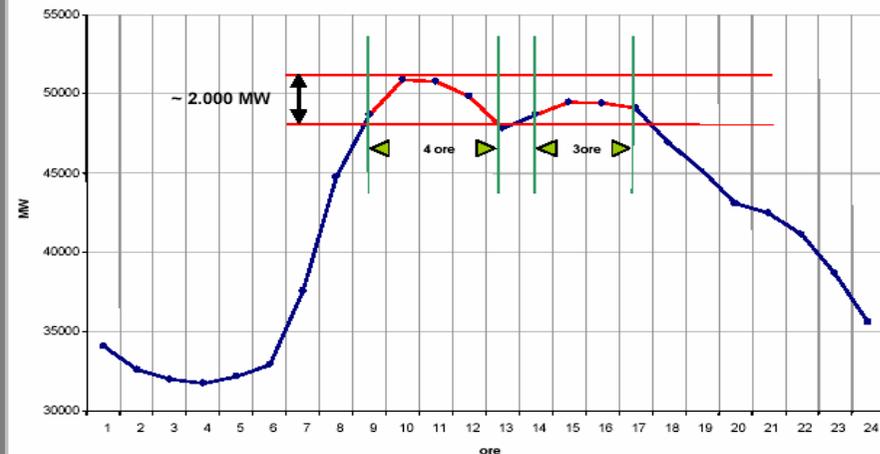


PICCHI ELETTRICI ESTIVI

- Nei Paesi (Usa, Giappone, Italia) dove si è sviluppato il condizionamento residenziale si hanno elevati carichi elettrici estivi (tradizionalmente si avevano in inverno per la presenza delle industrie) e durante le ore più calde (anziché quando si illumina)
- Le aziende elettriche devono sopperire ad i picchi di richieste con apposite centrali (turbogas)
- Vengono applicate tariffe multiorarie dell'energia elettrica molto onerose in estate e nelle ore più calde



Fabbisogno tipo estivo



■ RIDUZIONE POTENZA ELETTRICA INSTALLATA

Per l'utente finale introdurre un condizionatore elettrico determina un incremento della potenza elettrica installata già elevata per la diffusione di apparecchiature elettriche soprattutto in conseguenza dell'Office Automation (PC, fax, fotocopiatrici, ...)

- 70 kW per condizionatori di classe 200 kW
- aumento del canone per un maggior impegno di potenza
- introduzione di una centrale elettrica con occupazione di spazi che potrebbero avere un elevato valore commerciale (utenze alberghiere)

■ ULTERIORI VANTAGGI E SVANTAGGI

- ❑ Sostanziale assenza di parti in movimento, con drastica riduzione di vibrazioni e rumorosità (le EHP impongono spesso costose opere di insonorizzazione)
- ❑ Buona durata ed affidabilità.

SVANTAGGI

- ❑ Elevato costo di acquisto.
- ❑ Efficienza di conversione non molto alta.
- ❑ Immaturità tecnologica.
- ❑ Scarsa disponibilità commerciale (soprattutto piccole taglie ad alimentazione indiretta)
- ❑ Necessità di ricorrere ad acqua di torre per la condensazione (inconveniente comune anche a EHP di taglie superiori 800 kW) inoltre la torre evaporativa è rumorosa.

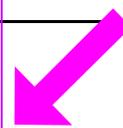
AHP: FUNZIONAMENTO E FLUIDI DI LAVORO

REFRIGERANTE + ASSORBENTE
SOLUTO SOLVENTE

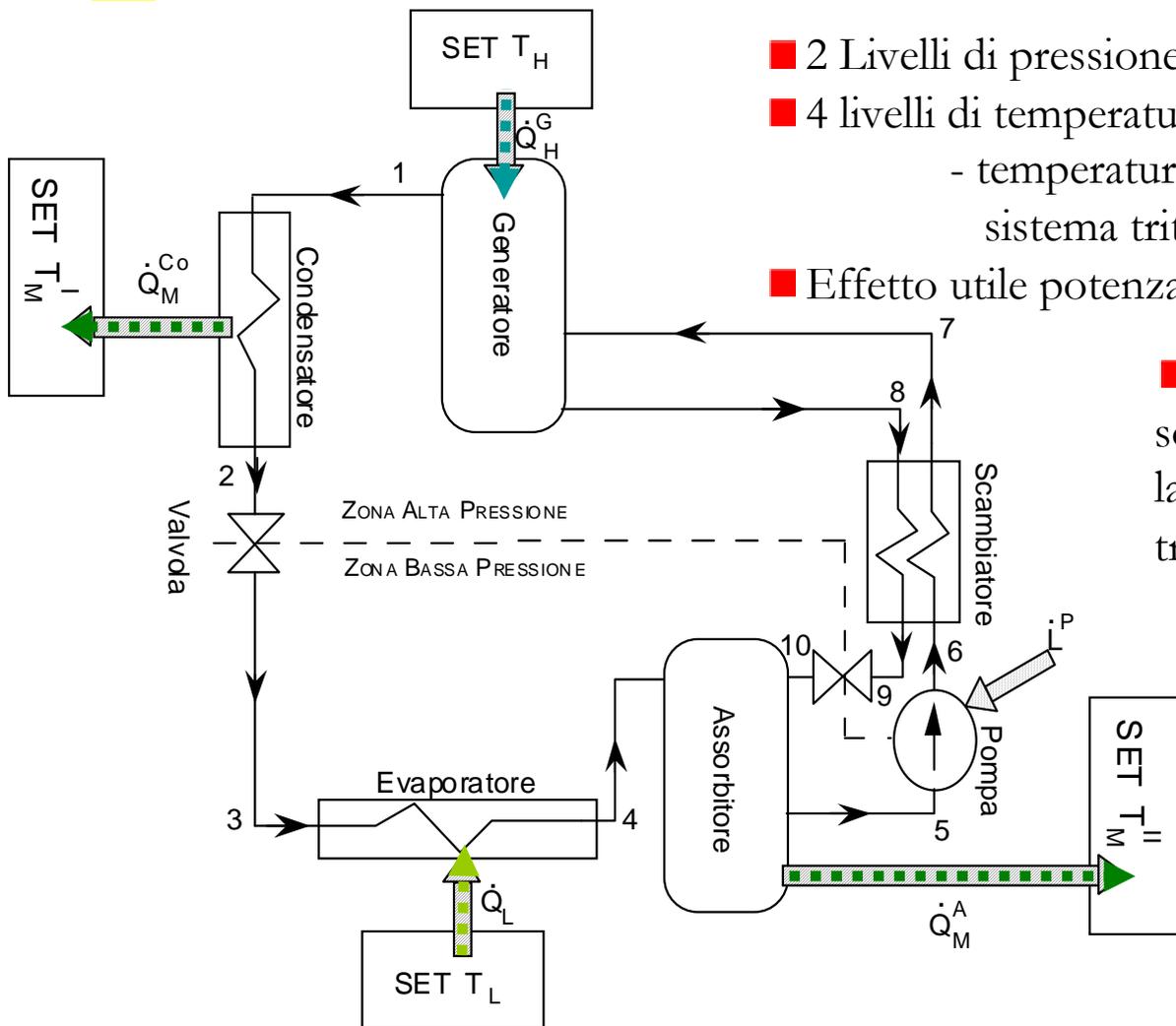
- Refrigerante: evaporando sottrae energia termica all'ambiente.
- Assorbente: assorbendo il refrigerante aumenta la velocità di evaporazione.
- Per un funzionamento ciclico occorre evitare che per diluizione del refrigerante, l'assorbente perda la sua capacità;
 - fase di rigenerazione: per adduzione di energia termica il refrigerante evapora e la miscela (solvente+soluto) si impoverisce di refrigerante
- Esistono diverse tipologie:
 - Monostadio (collettori piani o a tubi evacuati)
 - Bistadio, Tristadio (collettori a concentrazione)
- Coppie di fluidi utilizzate:

Monostadio attivate a 70 °C. Richiede l'uso di una torre evaporativa

Refrigerante	Assorbente
Ammoniaca NH ₃	Acqua H ₂ O
Acqua H ₂ O	Bromuro di Litio LiBr



SCHEMA DI FUNZIONAMENTO



■ 2 Livelli di pressione

■ 4 livelli di temperature

- temperature intermedie uguali:
sistema tritermo

■ Effetto utile potenza sottratta al SET TL

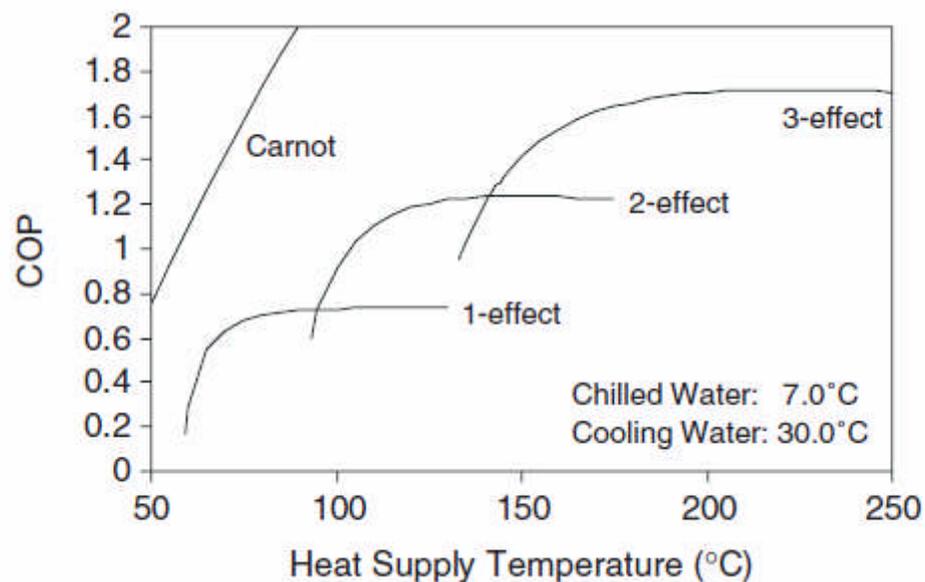
■ Spesa energetica potenza
somministrata dal SET TH,
lavoro di pompa
trascurabile.

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H}$$

COEFFICIENTI DI PRESTAZIONI DI AHP IN RAFFREDDAMENTO

Monostadio		Bistadio		
Indiretta	Diretta	Indiretta	Diretta	
0.7	0.6	#	0.95	(3)
0.6		1.1		(6)
0.67	#	1.21	1.15	(4,7)
0.65 - 0.70		1.22 - 1.27		(5)
0.60 - 0.70		1.00 - 1.20		(1)

acqua refrigerata 12 – 7 °C, acqua di torre 30°C



■ AHP: MODELLI IN COMMERCIO

Chiller da 14 kW della **DY Refrigeration**

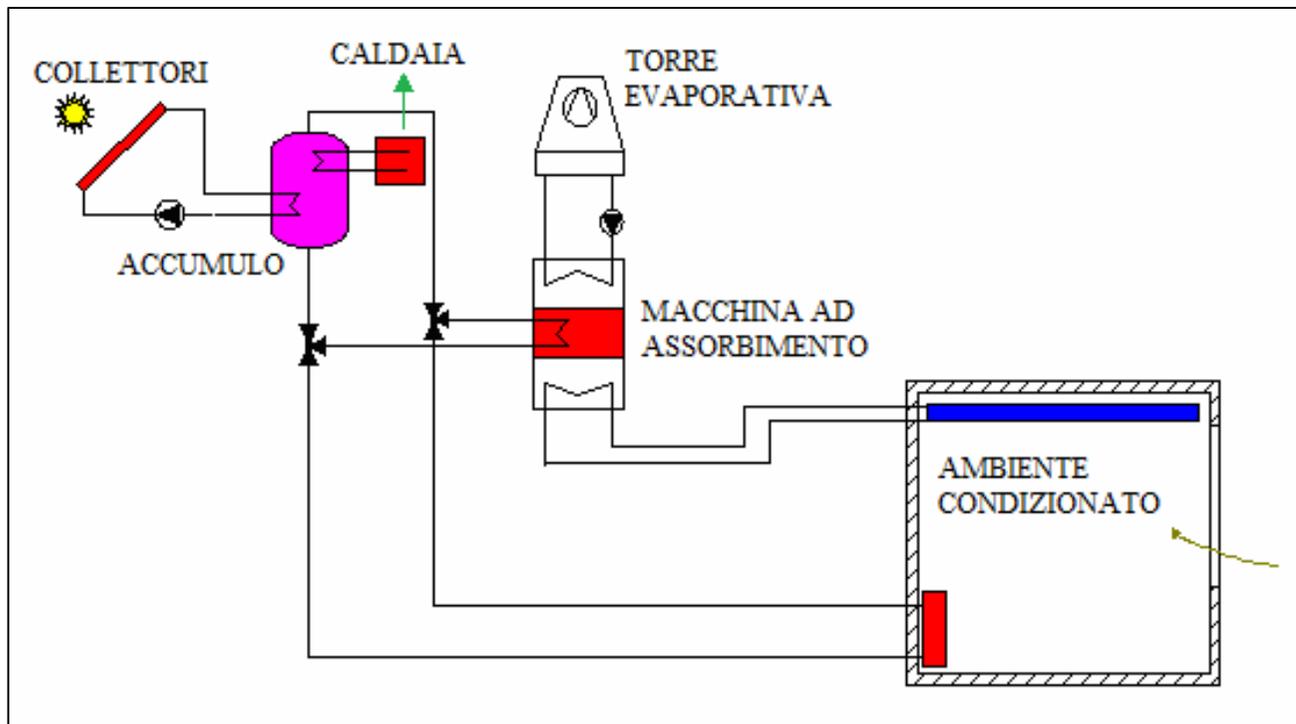


■ Esistono numerosi modelli in commercio, dalle taglie più piccole (poche decine di kW) fino agli assorbitori di grande potenza (migliaia di kW frigoriferi). È la tecnologia più utilizzata in applicazioni solari

■ Nella quasi totalità dei casi, sono macchine raffreddate ad acqua, con relativa torre di raffreddamento. Esistono modelli di piccola taglia, monostadio, raffreddati ad aria.

■ Si stanno diffondendo piuttosto rapidamente anche in Italia nel settore terziario (alberghi, ospedali, uffici).

ESEMPIO DI INTEGRAZIONE CON COLLETTORI SOLARI



Si distinguono:

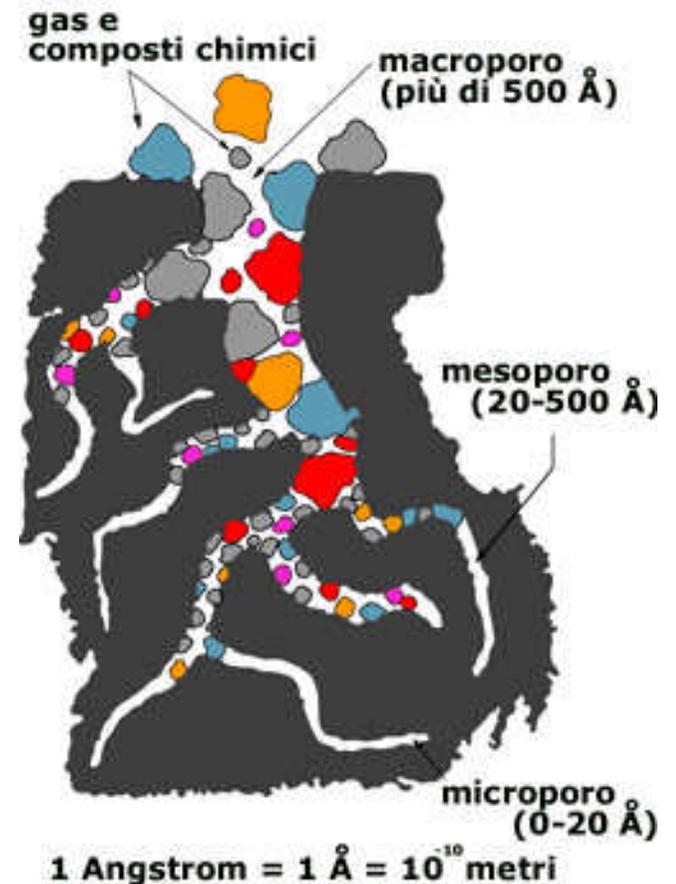
- Il sottosistema solare comprensivo di **accumulo** e **dispositivo di integrazione (caldaia)**;
- La macchina frigorifera provvista di **torre evaporativa**;
- L'ambiente condizionato con i relativi **terminali d'impianto**.

L'impianto considerato risponde alle richieste di riscaldamento ed acqua calda sanitaria nel periodo invernale ed intermedio, ed alle richieste di raffrescamento nel periodo estivo.

La macchina frigorifera impiegata funziona secondo il ciclo ad assorbimento, il sistema di integrazione scelto è di tipo a gas ed ha le potenzialità di rispondere alle richieste dell'utenza anche in completa assenza di radiazione incidente.

■ ADSORBIMENTO

- L'adsorbimento è un processo fisico-chimico in base al quale uno o più componenti di una fase fluida (liquido o gas) si trasferiscono sulla superficie di un solido.
- Il trasferimento di materia è causato da processi diffusionali dovuti all'esistenza di gradienti di:
 - polarità
 - peso molecolare
 - dimensioni.
- Il processo di adsorbimento è esotermico ed è favorito:
 - a temperatura costante da elevate pressioni
 - a pressione costante da basse temperature



INTRODUZIONE

- le molecole del soluto (adsorbato: tipicamente acqua nelle applicazioni per refrigerazione) trattenute dall'adsorbente solido, si fermano in punti specifici della superficie detti siti attivi, da cui poi, modificando le condizioni ambientali, possono essere rimossi.

- Riscaldando la coppia adsorbente/adsorbato, l'adsorbato tende a distaccarsi e quindi l'adsorbente può essere rigenerato per un processo ciclico.

- Essendo un processo che avviene sulla superficie di un solido, essenziale è un'estesa superficie di contatto solido-fluido ed è dunque necessario utilizzare particelle molto porose

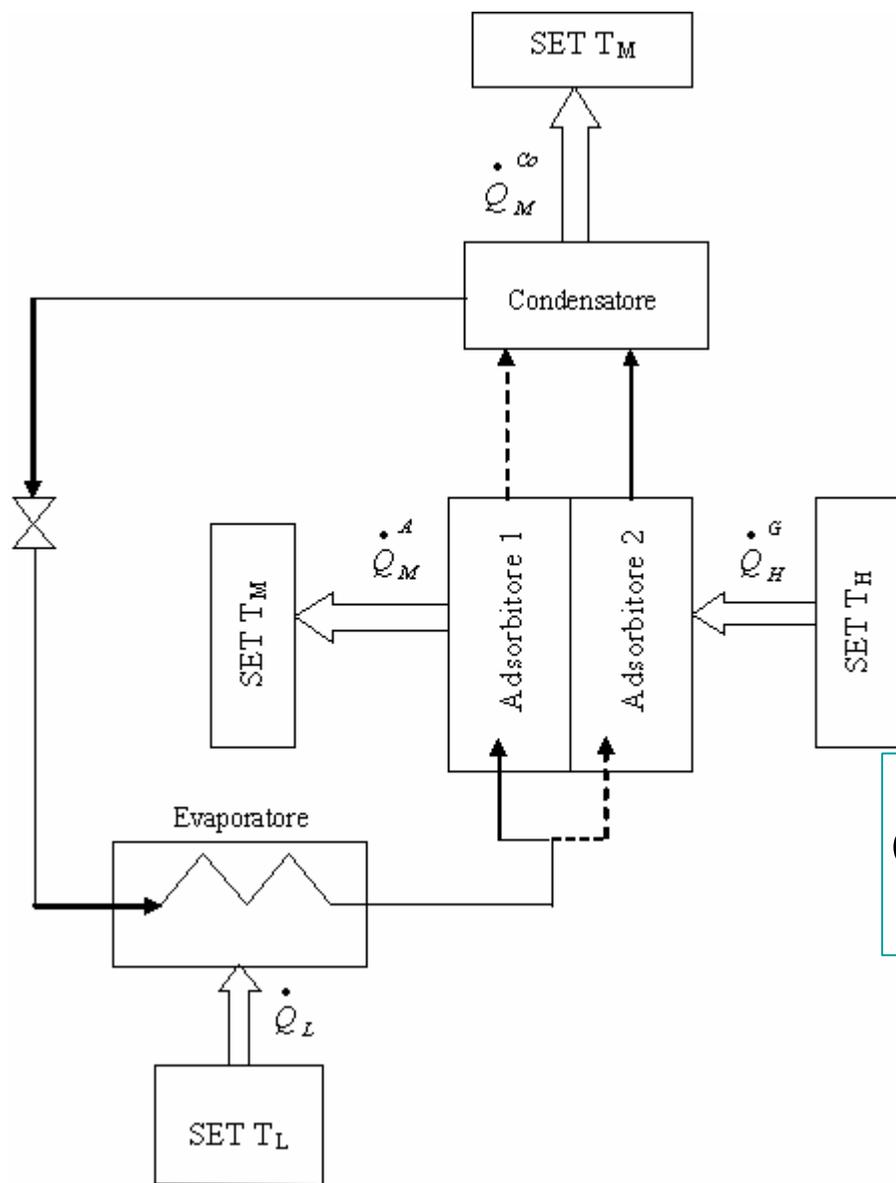
- I materiali adsorbenti di utilizzo tecnologico sono di diversa natura in funzione delle caratteristiche delle sostanze con cui vengono fatti interagire: gel di silice, zeoliti, carbone attivo.

CICLO DI ADSORBIMENTO

Nelle applicazioni frigorifere a ciclo chiuso si fa uso abitualmente di:

- acqua: refrigerante, adsorbito in fase vapore;
- Gel di silice: adsorbente;
- Data la natura solida dell'adsorbente il funzionamento ciclico impone l'uso di due letti adsorbenti (Ads.1 e Ads. 2) alternativamente riscaldati (rigenerazione) e raffreddati con cessione di energia termica all'ambiente esterno
- L'effetto frigorifero avviene nell'evaporatore dove l'acqua evapora per poi essere adsorbita in uno dei due letti (Ads. 1)
- Il vapore rilasciato in fase di rigenerazione viene convogliato dal letto adsorbente (Ads. 2) al condensatore dove, interagendo con l'ambiente esterno, l'acqua viene riportata in fase liquida
- Sono necessarie due fasi in cui entrambi i letti sono isolati dal condensatore e dal evaporatore per ripristinare le pressioni e consentire l'apertura della relativa valvola nella successiva trasformazione.

GRUPPI FRIGORIFERI AD ADSORBIMENTO (ADHP)



- 2 Livelli di pressione
- 4 livelli di temperature
 - temperature intermedie uguali: sistema tritermo
- Effetto utile potenza sottratta al SET T_L

- Spesa energetica potenza somministrata dal SET T_H.
- Totale assenza di un apporto di energia meccanica/elettrica per l'azionamento di pompe di circolazione.

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H^G}$$

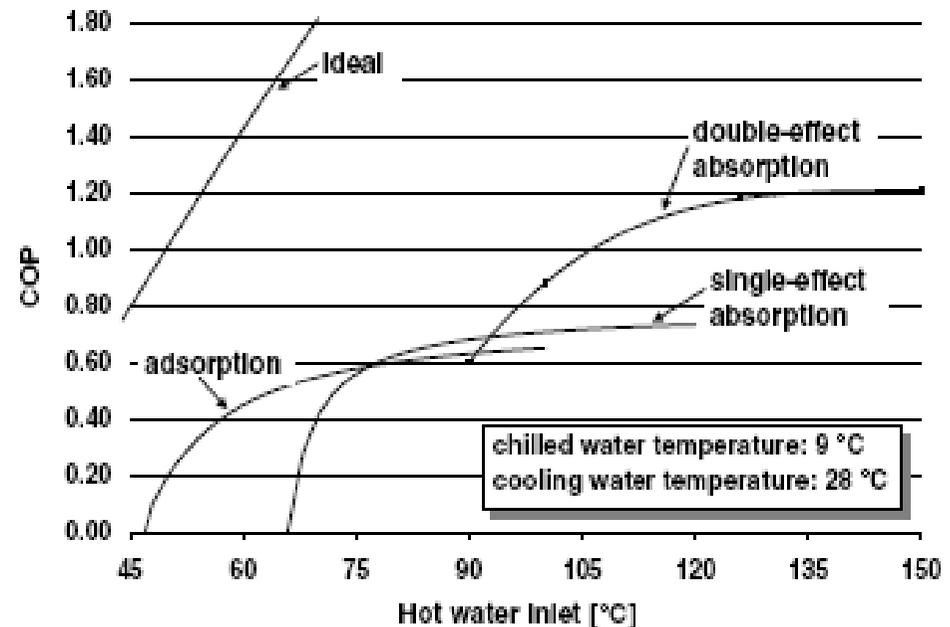
VANTAGGI E SVANTAGGI

VANTAGGI

- Rapido start-up
- Attivazione termica a basse temperature
- Molto robusti ed affidabili

SVANTAGGI

- Peso e dimensioni considerevoli
- Processo intrinsecamente discontinuo
- COP sono più bassi rispetto assorbitori
- Meno diffusi commercialmente
- Costi ancora molto elevati



ADHP: MODELLI IN COMMERCIO



SolaTech ACS 08

(Germany)

Marzo 2008

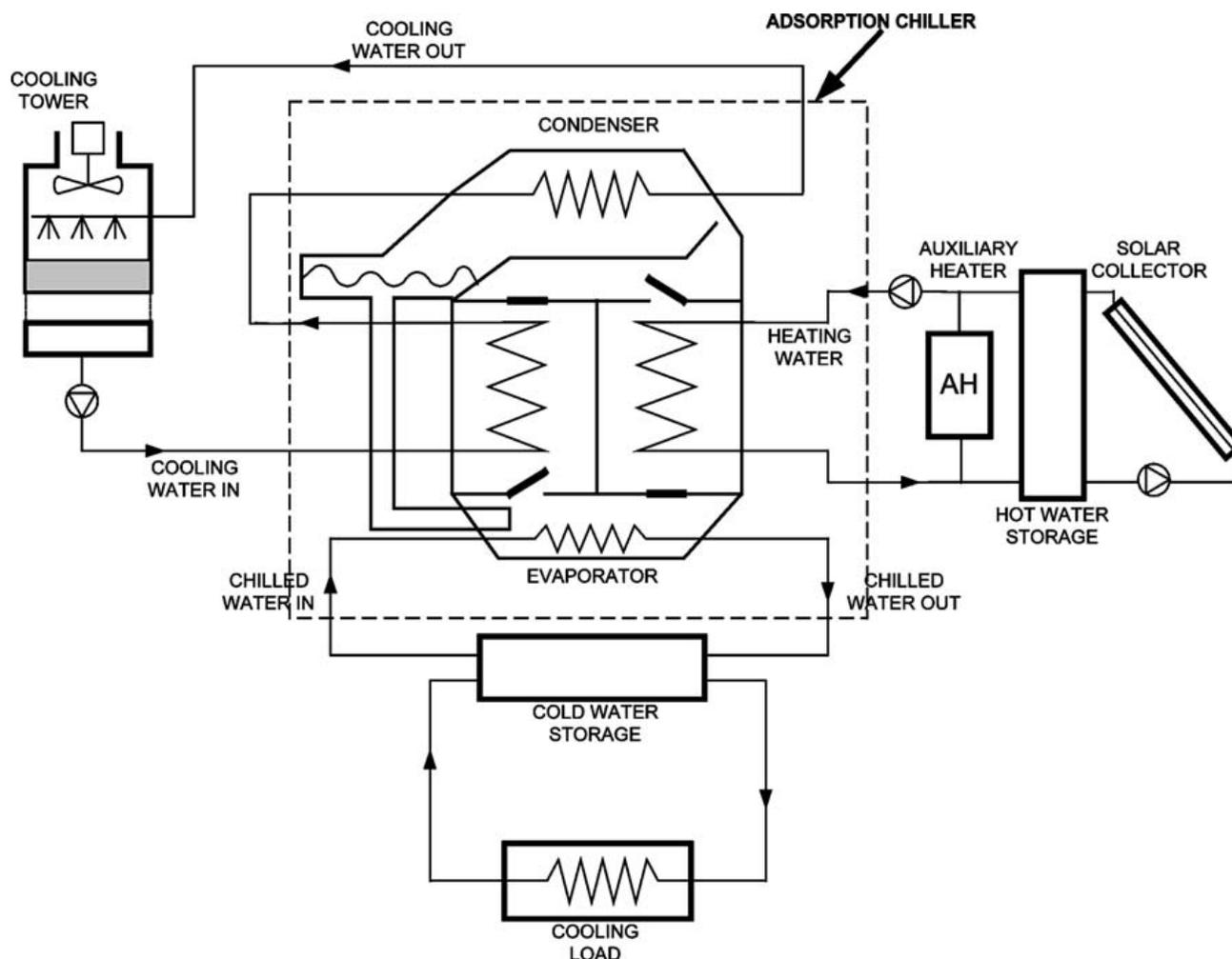
PRIMO MODELLO
COMMERCIALIZZATO

Al momento sono disponibili un numero limitato di prodotti, aventi una taglia di potenza in raffreddamento 50 – 430 kW ed un COP 0,5 – 0,7.

Technical data ACS 08

Cooling Capacity	7.5 kW
Thermal COP	0.56
Electricity Consumption	9 W
Chilled Water Circuit	18/15 °C at 2.0 m ³ /h
Heat Rejection Circuit	27/32 °C at 3.7 m ³ /h
Heat Supply Circuit	72/67 °C at 1.6 m ³ /h

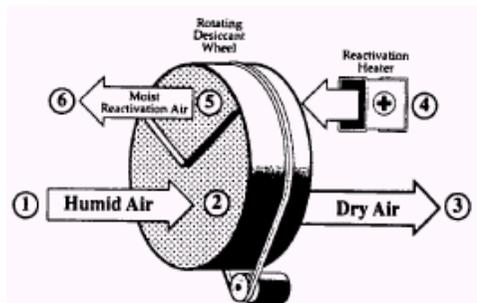
ESEMPIO INTEGRAZIONE CON COLLETTORI SOLARI



Si distinguono:

- Il sottosistema solare comprensivo di **accumulo** e **dispositivo di integrazione (caldaia)**;
- La macchina frigorifera provvista di **torre evaporativa**;
- Il sistema di “produzione” del freddo comprensivo di accumulo.

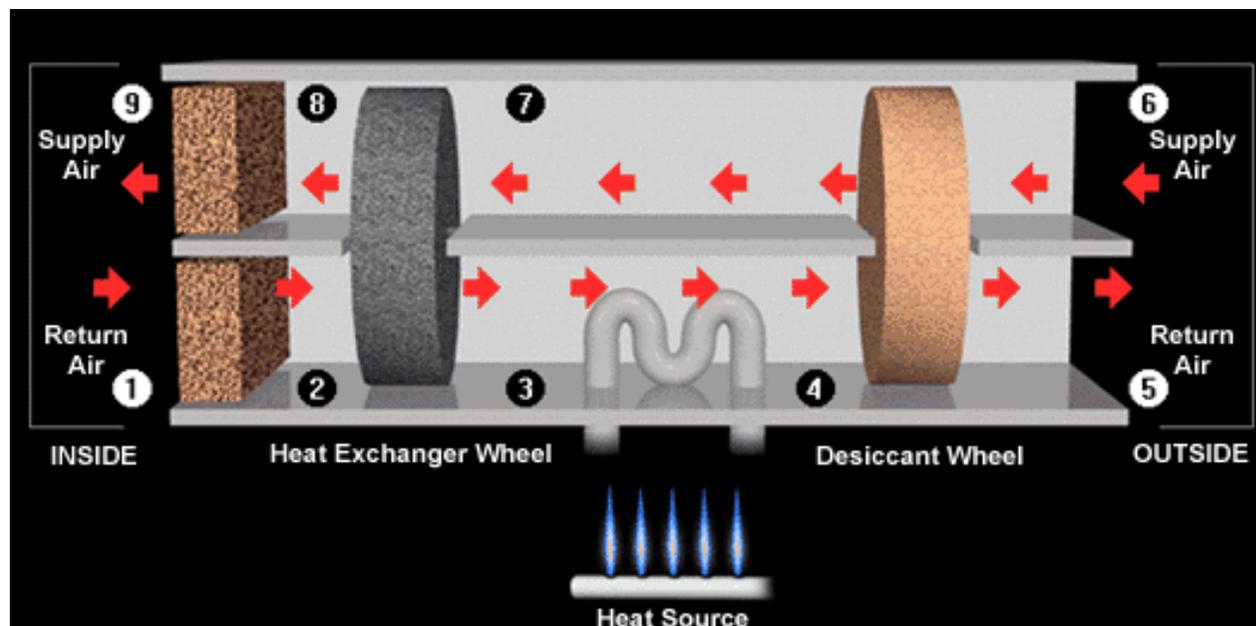
LA DESICCANT WHEEL (I/II)



Il processo determina un incremento di temperatura dell'aria; è necessario rimuovere il carico sensibile mediante raffreddamento evaporativo (DEC, Desiccant Evaporative Cooling) o con un chiller (sistemi HVAC ibridi).

- Il vapor d'acqua contenuto nell'aria umida viene adsorbito dal materiale che costituisce la ruota (sostanzialmente gli stessi utilizzati nelle ADHP).

- La ruota deve essere "rigenerata" con un secondo flusso d'aria, riscaldato mediante una idonea "sorgente" di energia termica.



ULTERIORI VANTAGGI

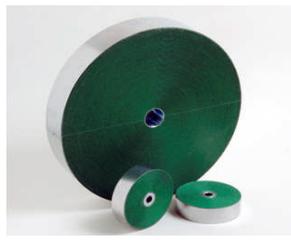
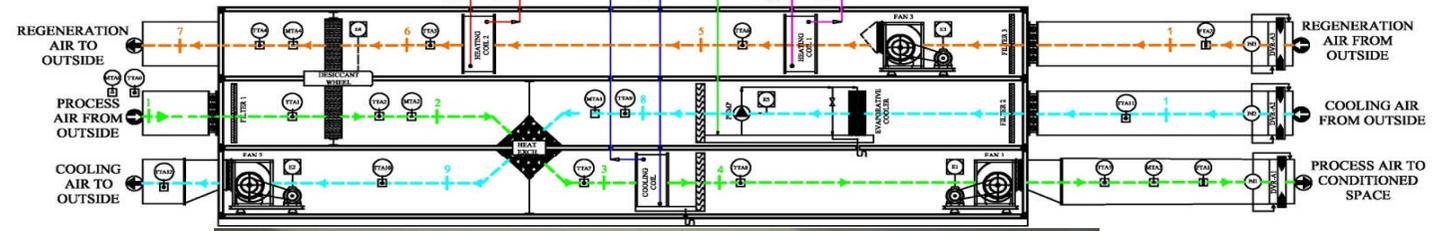
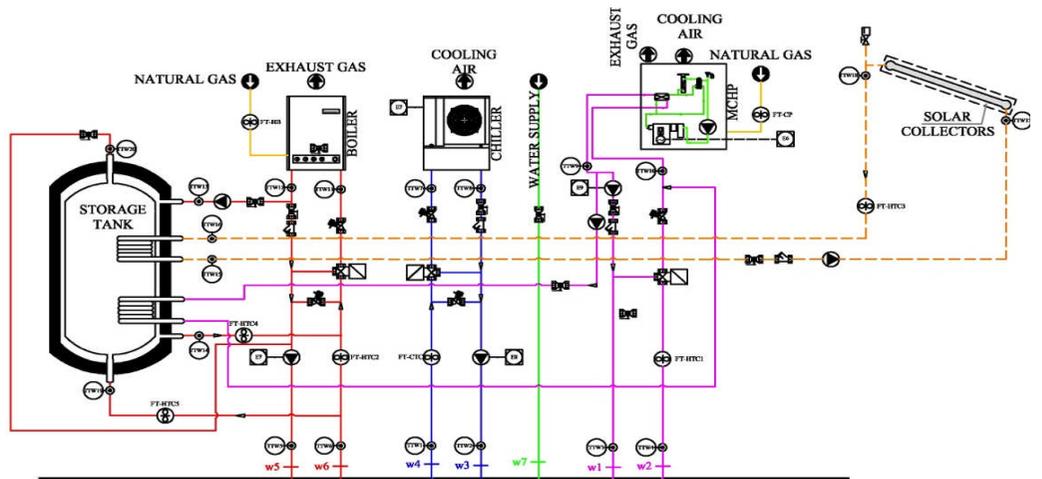
- COP del chiller elettrico più elevato rispetto ai sistemi convenzionali di raffrescamento e deumidificazione meccanici (nei sistemi DEC il chiller è del tutto assente!)

- Assenza del postriscaldamento

- Controllo separato di temperatura e umidità negli ambienti condizionati

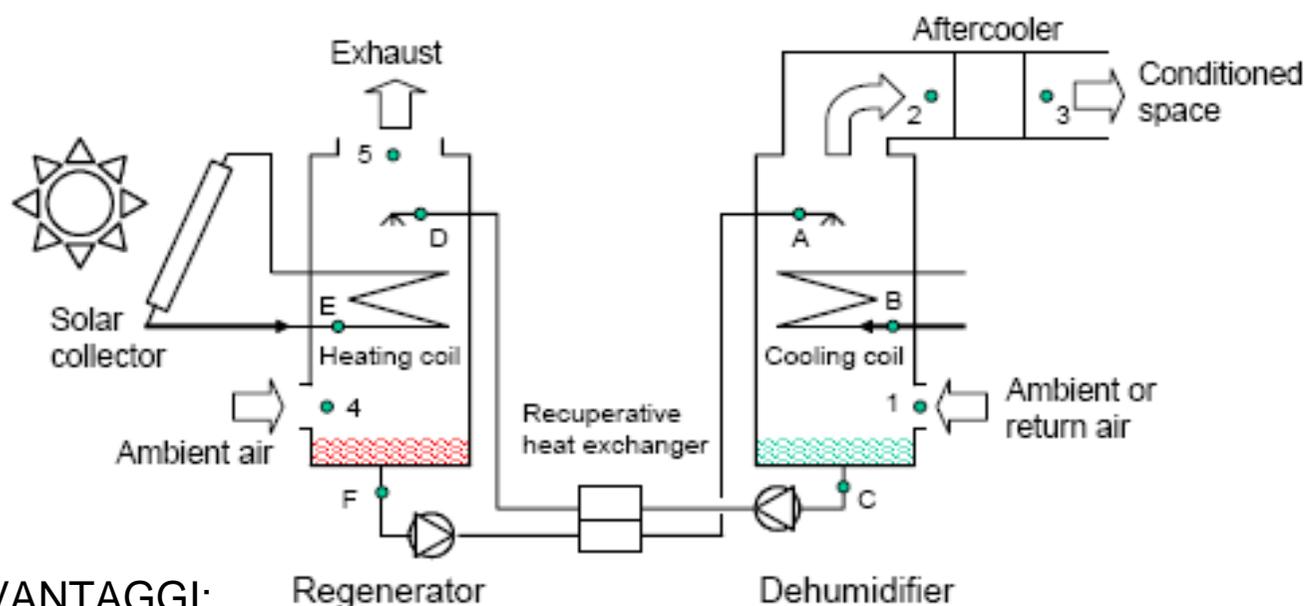
- Temperature di rigenerazione sufficientemente basse (70-80°C)

ATTIVITA' DI RICERCA UNISANNIO: INTEGRAZIONE SOLARE



LIQUID DESICCANT COOLING

Vengono utilizzati essiccanti liquidi (soluzioni di cloruro di litio o di cloruro di calcio) viene distribuito in una camera per entrare in contatto con l'aria da deumidificare. La concentrazione della soluzione viene poi ristabilita spruzzando parte di essa in una sezione di rigenerazione. La rigenerazione avviene mediante un flusso d'aria con temperature di rigenerazione non particolarmente elevate che permettono l'accoppiamento con collettori solari.



Si distinguono:

- I collettori solari;
- Il deumidificatore con al suo interno il circuito di raffreddamento;
- Uno scambiatore di recupero che preriscalda la soluzione diluita proveniente fredda dal deumidificatore (C) mediante la soluzione concentrata proveniente calda

VANTAGGI:

- elevato livello di deumidificazione a parità di temperatura di alimentazione del vettore termico, rispetto ai sistemi che utilizzano sostanze solide
- possibilità di immagazzinare energia attraverso l'accumulo della soluzione concentrata.

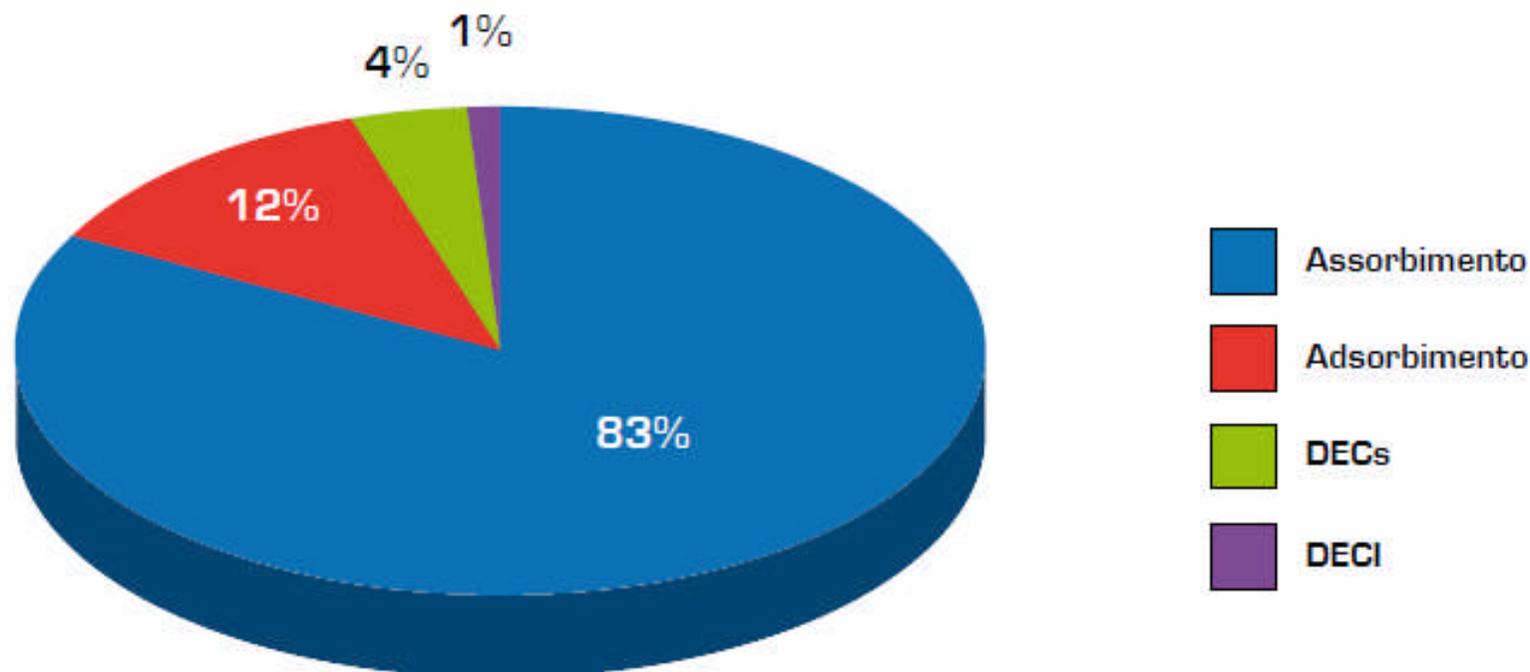
CONCLUSIONI

- ❑ Le AHP sono una consolidata tecnologia per la trigenerazione a partire da cogeneratori alimentati a gas naturale
- ❑ Iniziano ad essere disponibili ed utilizzati modelli di sistemi ad attivazione termica anche per applicazione solare basati su diverse tecnologie

Metodo	Ciclo chiuso		Ciclo aperto	
Ciclo refrigerante	Ciclo refrigerante chiuso		Il refrigerante (acqua) è in diretto contatto con l'atmosfera	
Principio	Acqua refrigerata		Deumidificazione dell'aria e raffreddamento evaporativo	
Fase di assorbimento	solido	liquido	solido	liquido
				
Materiale	acqua – sillica gel	acqua – bromuro di litio ammoniaca - acqua	acqua – sillica gel acqua – cloruro di litio	acqua – cloruro di calcio acqua – cloruro di litio
Tecnologia disponibile sul mercato	Macchina ad adsorbimento	Macchina ad assorbimento	<i>Desiccant cooling</i>	Prossimo alla commercializzazione
Tipica taglia di potenza (raffreddamento)	50 – 430 kW	15 kW – 5 MW	20 kW – 350 kW (per modulo)	
Tipico COP	0.5 – 0.7	0.6 – 0.75 (singolo effetto)	0.5 – >1	> 1
Temperatura di funzionamento	60 – 90 °C	80 – 110 °C	45 – 95 °C	45 – 70 °C
Collettori solari	Tubi sotto vuoto, collettori solari piani	Tubi sotto vuoto	Collettori solari piani, collettori ad aria	Collettori solari piani, collettori ad aria

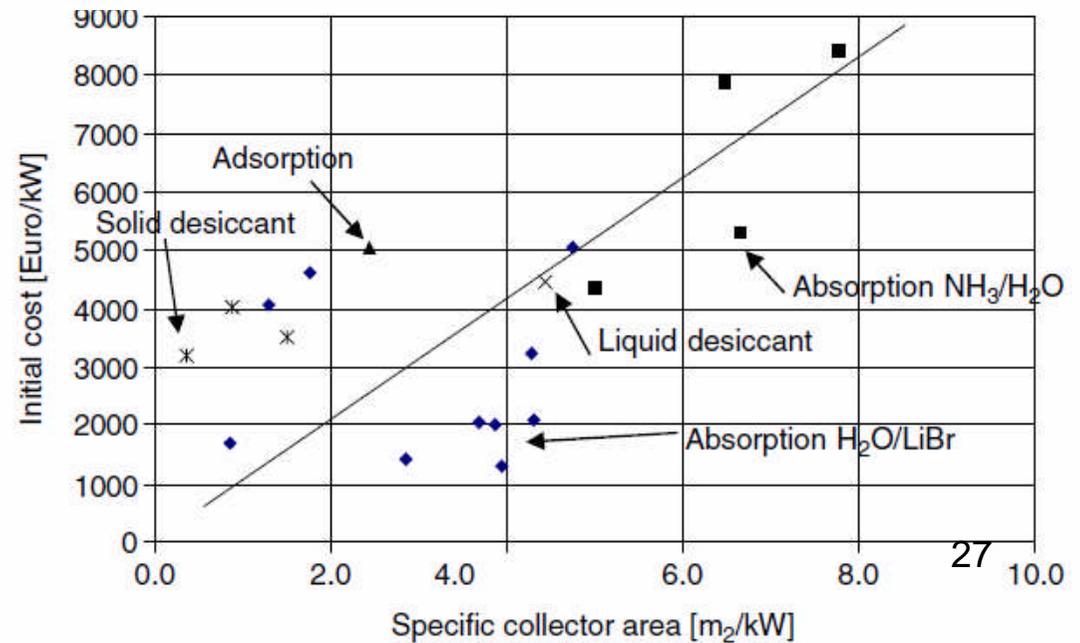
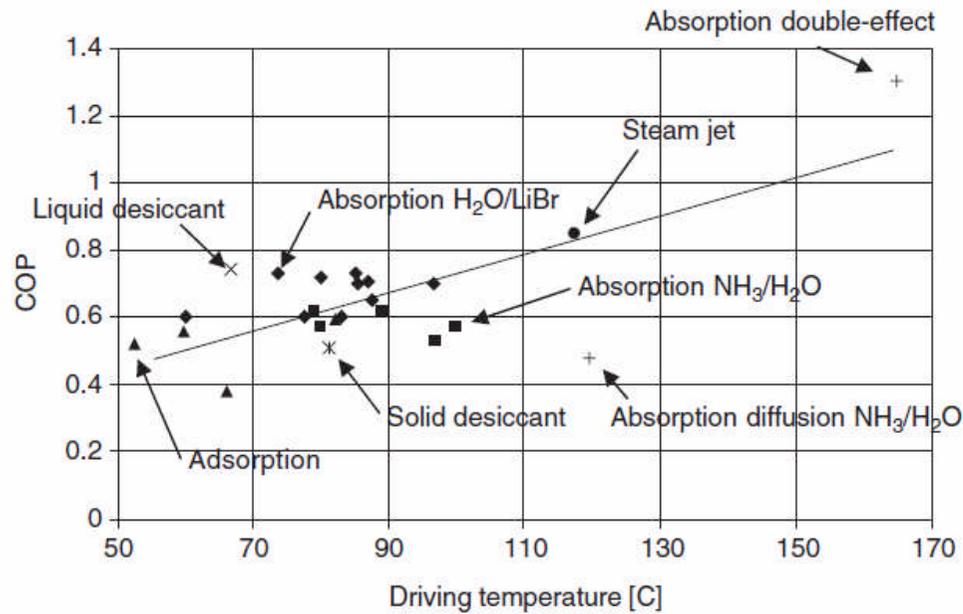
Distribuzione della potenza installata in impianti solar cooling

All'inizio del 2010, l'IEA ha censito 288 installazioni commerciali di solar cooling al mondo, per una potenza installata di 17,61 MW. Di questi, 28 impianti sono in Italia, per una potenza installata di 3,2 MW.



Distribuzione installazioni

Fonte: C.A. Balaras et al., Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007



Costo impianti solar cooling

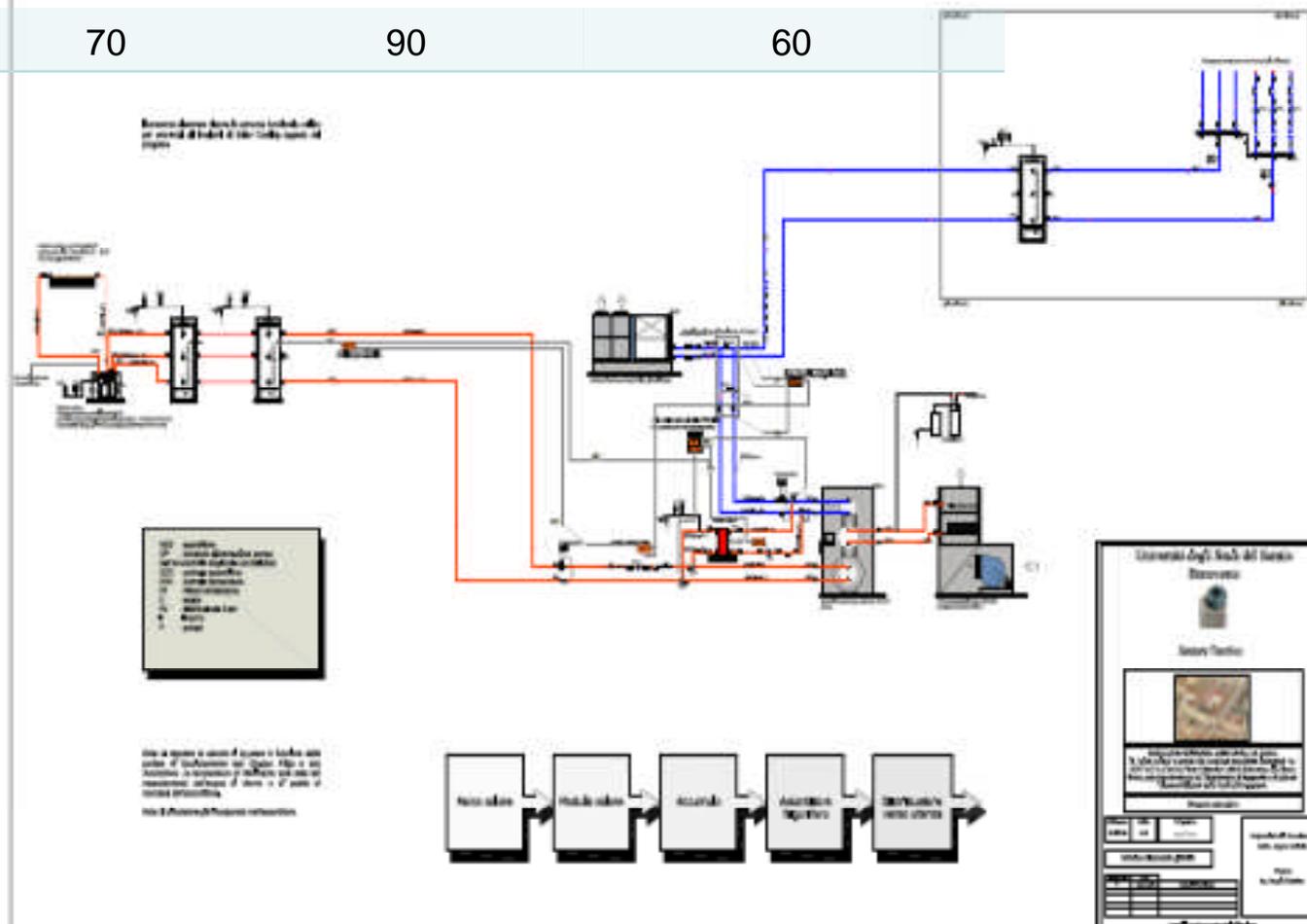
Il costo specifico di un impianto solar cooling diventa comparabile a quello di un condizionatore tradizionale solo per sistemi con potenza oltre i 100 kW. Tenendo però conto del risparmio di energia elettrica che tali sistemi possono garantire, si stima che sia conveniente, anche in assenza di incentivi, installare impianti a partire da 70 kW frigoriferi, ovvero per edifici di circa 600 m².

Taglia d'impianto	Costo (€ / kW)	
	Impianti <i>solar cooling</i>	Impianti tradizionali
< 20 kW	4.000 - 5.500	750 - 900
20 - 100 kW	2.000 - 3.500	600 - 700
> 100 kW	500 - 1.000	450 - 550

Solar heating and cooling a Benevento

Impianto	Superficie collettori [m ²]	Potenza assorbitore [kW]	Copertura fab. climatizzazione estiva [%]	Copertura fab. climatizzazione invernale [%]
Convitto Giannone	150,64	70	96	51
Ex-Inps	150,64	70	92	51
Via Calandra	301,28	70	90	60

Sono stati finanziati tre impianti di "Solar Heating and Cooling" a Benevento presso edifici dell'Università degli Studi del Sannio.



GREEN CHILLER ASSOCIATION

Company	Location	Profile
 ago energie + anlagen	Kulmbach (Germany)	Manufacturer of Ammonia/Water Absorption Chillers (30 – 500 kW)
	Westenfeld (Germany)	Manufacturer of Water/Lithium Bromide Absorption Chillers (15 – 200 kW)
 Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme	Freiburg (Germany)	Research Institute for Solar Energy Systems, Cooperation with SorTech
 ILK Dresden	Dresden (Germany)	Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden, Developments in Cooperation with EAW and AGO
	Berlin (Germany)	Manufacturer of Water/Zeolith Adsorption Chillers (7 – 10 kW)
	Langenwang (Austria)	Manufacturer of a Ammonia/Water Absorption Chiller for SolarNext (12 kW)
 SOLARNEXT	Rimsting (Germany)	System Supplier of thermally driven Absorption/ Adsorption Chillers and Cooling Kits (7 – 50 kW)
 SONNENKLIMA suninverse	Berlin (Germany)	Manufacturer of a Water/Lithium Bromide Absorption Chiller (10 kW)
 SorTech AG	Halle (Germany)	Manufacturer of Water/Silica Gel (and Water/Zeolith) Adsorption Chillers (8 – 15 kW)

CONCLUSIONI

- ❑ Questi dispositivi integrati a collettori solari hanno effettive potenzialità di risparmio di energia primaria e contenimento delle emissioni clima_alteranti

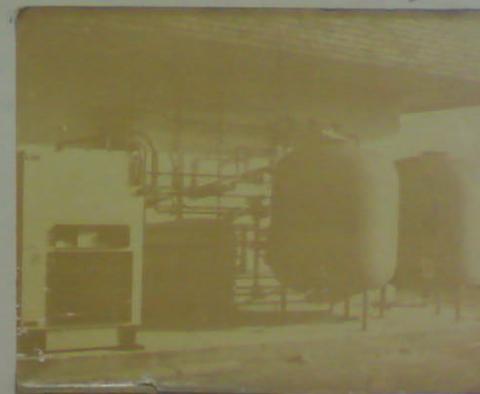
UTENZA	REP				ΔCO_2			
	CASO1		CASO2		CASO1		CASO2	
	Piani	Evac	Piani	Evac	Piani	Evac	Piani	Evac
RESIDENZIALE	0.389	0.563	0.455	0.586	0.425	0.589	0.472	0.606
ALBERGHIERA	0.209	0.384	0.387	0.512	0.301	0.455	0.399	0.526

- ❑ Permangono numerosi vincoli di natura:
 - ❑ economica;
 - ❑ tecnologica;
 - ❑ di gestione ottimizzata;
 - ❑ burocratica (in relazione agli strumenti di supporto)

1980: Proff. A. CESARANO, V. NASO

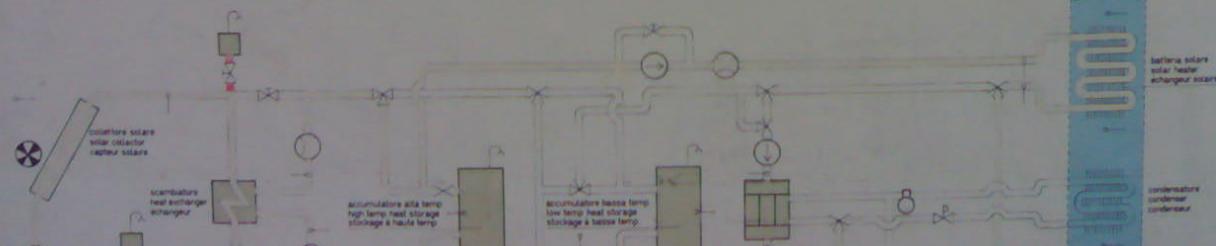
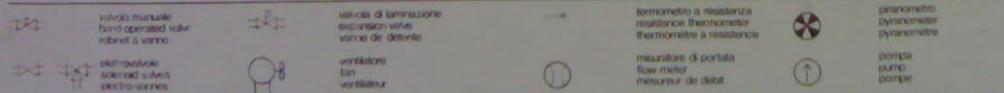
Istituto di Fisica Tecnica dell'Università di Napoli.

Impianto sperimentale di condizionamento a pompa di calore elioassistita.
Solar assisted heat pump heating and cooling demonstration system.
Installation expérimentale de climatisation par pompe à chaleur et capteurs solaires.



Alcune delle possibili configurazioni nel funzionamento invernale.
 Typical flow diagrams in winter operation.
 Schémas d'exploitation possibles pendant l'hiver.

Riscaldamento con batteria solare ed accumulo ad alta temperatura.
Direct solar heating and high temperature storage.
Chauffage avec échangeur solaire et stockage à haute température.





Prof. Maurizio Sasso - EnergMed, 23 Marzo 2012, Napoli

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Prof Maurizio Sasso, sasso@unisannio.it



www.microgen3.eu