

L'IMPIANTO FRIGORIFERO SPERIMENTALE AD ASSORBIMENTO DELL'UNIVERSITA' DI PERUGIA: MESSA A PUNTO E PRIMI RISULTATI SPERIMENTALI

Franco Cotana*, Andrea de Lieto Vollaro **, Francesco -Asdrubali*, Giorgio Baldinelli*

*Università degli Studi di Perugia - Dipartimento di Ingegneria Industriale, Via G. Duranti 1/A-4 Perugia

**Università di Roma La Sapienza - Dipartimento di Fisica Tecnica, Via Eudossiana 18 Roma

SOMMARIO

Nel lavoro è presentato un impianto sperimentale per la simulazione e la verifica delle prestazioni di una macchina frigorifera ad assorbimento a singolo stadio, funzionante ad Acqua - Bromuro di Litio.

La macchina è alimentata ad acqua calda prodotta da un bollitore elettrico; è possibile simulare diverse condizioni di funzionamento variando le temperature di alimentazione e di raffreddamento della macchina e le portate dei fluidi esterni. La strumentazione di misura consente di conoscere istante per istante tutti i principali parametri di funzionamento dei circuiti esterni ed interni della macchina (temperature, pressioni e portate); la lettura di tutte le grandezze menzionate è eseguita tramite un sistema di acquisizione computerizzato.

Nel lavoro sono presentate le caratteristiche dell'impianto, i risultati delle prime prove sperimentali e il programma di ricerca futuro. In particolare, la prima campagna di misure effettuate ha permesso di verificare le condizioni di funzionamento della macchina e di calcolare le relative prestazioni energetiche ed exergetiche; si è inoltre effettuato un confronto tra i dati ottenuti dalle misure con quanto riportato in Letteratura per macchine simili. Si è riscontrato che, per il funzionamento della macchina, sono sufficienti temperature di alimentazione attorno ai 65- 70°C, risultato interessante in vista di una possibile alimentazione con energia solare o con cascami di calore di processi industriali.

1) INTRODUZIONE

Il riscaldamento globale dell'atmosfera terrestre a causa dell'accumulo di gas serra sembra mettere a repentaglio i complessi equilibri meteorologici del pianeta. Per limitare le emissioni di CO₂ e di CFC, ritenuti fra i principali responsabili dell'effetto serra e della diminuzione dello strato di ozono che circonda l'atmosfera, negli scorsi anni sono stati firmati 2 documenti di fondamentale importanza: il Protocollo di Montreal e il Protocollo di Kyoto. In tali accordi si è definito un programma di riduzione delle emissioni da parte delle Nazioni Unite, da attuare gradatamente fino al 2010. Una via efficace per il contenimento della produzione di CO₂ è costituita dall'impiego di energia degradata, altrimenti destinata alla dispersione nell'ambiente, come ad esempio calore a bassa temperatura. I cicli frigoriferi alimentati con cascami di calore rappresentano un'applicazione promettente per la soluzione di problematiche energetico-ambientali; fra le possibili soluzioni tecniche risulta particolarmente interessante il ciclo ad assorbimento con acqua e bromuro di litio, dato che tale coppia refrigerante-assorbente è caratterizzata da numerosi vantaggi quali l'elevato calore di trasformazione e la non tossicità e pericolosità [1]. Presso i Dipartimenti di Fisica Tecnica dell'Università di Roma "La Sapienza" e di Ingegneria Industriale dell'Università di Perugia sono da anni attivi gruppi di ricerca che si occupano di tecnologie frigorifere alternative, ed in particolare dei sistemi ad assorbimento; gli aspetti affrontati hanno riguardato la misura delle proprietà termofisiche di nuovi fluidi [2], [3], [4], [5], [6], la valutazione delle prestazioni di nuovi cicli e macchine [7], [8], [9], la realizzazione di nuovi prototipi [10], [11]. L'impianto sperimentale descritto nella presente memoria nasce dalla collaborazione tra i due Dipartimenti menzionati ed assume una duplice valenza: scientifica, al fine di verificare

le prestazioni della macchina al variare delle condizioni operative e di validare quindi i modelli termodinamici sviluppati, e didattica.

La ricerca è stata finanziata nell'ambito del Progetto di ricerca di interesse nazionale ex-40% "Cicli termodinamici inversi per refrigerazione e pompe di calore: sviluppo di soluzioni a basso impatto ambientale - Sistemi di raffreddamento non convenzionali".

2) DESCRIZIONE DELLA MACCHINA AD ASSORBIMENTO

La macchina ad assorbimento dell'impianto sperimentale, di fabbricazione giapponese, è del tipo a singolo stadio ed impiega quale fluido di lavoro acqua-bromuro di litio. E' costituita dai quattro elementi essenziali di ogni gruppo ad assorbimento ossia generatore, evaporatore, condensatore ed assorbitore, secondo lo schema di principio di fig. 1 [12]. La macchina sviluppa una potenza frigorifera nominale pari a 17 kW, sfruttando una portata di $1,157 \times 10^{-3}$ m³/s d'acqua calda alla temperatura di 88°C. L'acqua refrigerata può scendere fino ad una temperatura minima di 8°C; in condizioni nominali essa è prodotta a 9°C, con un salto all'evaporatore di 6°C. La portata nominale di acqua refrigerata prodotta è pari a $0,83 \times 10^{-3}$ m³/s; le pressioni massime di lavoro al generatore e all'evaporatore sono pari rispettivamente a 98 kPa e 295 Pa. Per il raffreddamento di assorbitore e condensatore è necessaria una portata di $2,22 \times 10^{-3}$ m³/s di acqua, che si riscalda da 29,5°C a 34,5°C; la pressione massima del circuito di raffreddamento è pari a 295 kPa. La macchina è dotata di un ricircolo tra le soluzioni concentrata e diluita di generatore ed assorbitore, con un dispositivo di recupero del calore, e di un riscaldatore a cella di palladio, per l'estrazione dell'idrogeno che può formarsi all'interno del gruppo ad assorbimento. La

macchina in esame è priva di organi meccanici per la movimentazione della soluzione (pompe), essendo questa ottenuta per distillazione e gravità.

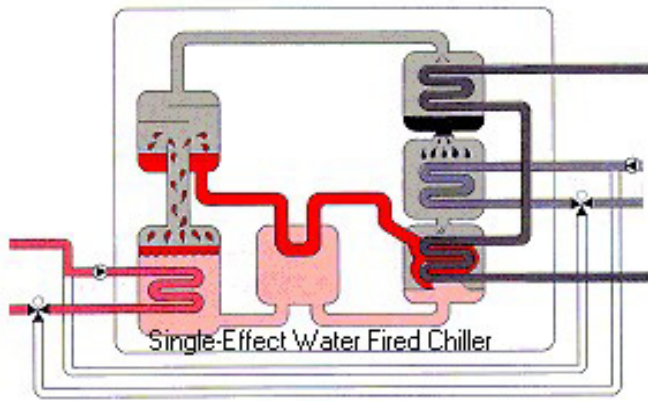


Figura 1: schema di principio di una macchina frigorifera ad assorbimento ad H₂O-LiBr.

I componenti della macchina oggetto della presente sperimentazione sono disposti secondo lo schema di fig. 2; si possono riconoscere:

- 1) generatore;
- 2) tubo di passaggio del vapore prodotto nel generatore;
- 3) separatore;
- 4) condensatore;
- 5) tubo ad U per garantire la caduta di pressione dal condensatore all'evaporatore;
- 6) evaporatore;
- 7) assorbitore;
- 8) scambiatore di calore fra le soluzioni;
- 9) ingresso generatore.

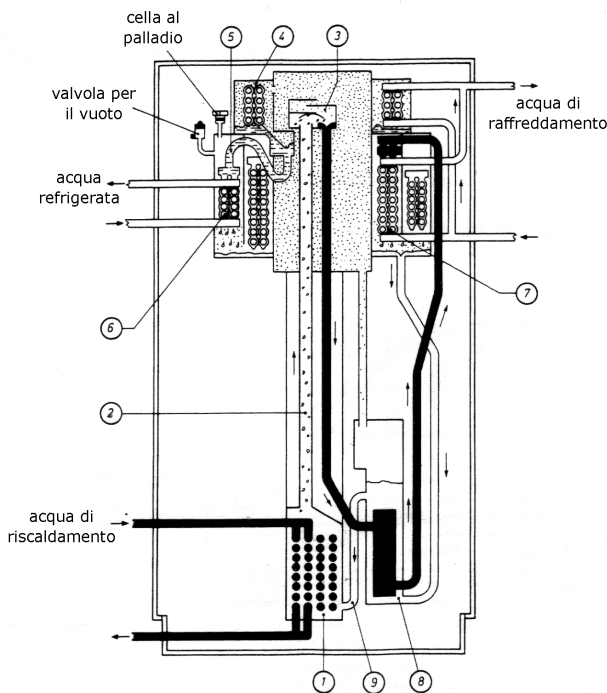


Figura 2: schema costruttivo della macchina utilizzata per la sperimentazione.

3) DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE

3.1) Circuiti esterni

Lo schema dell'apparato sperimentale realizzato presso il Laboratorio di Termotecnica dell'Università degli Studi di Perugia è riportato in fig. 3.

La parte centrale dell'impianto è costituita dalla macchina ad assorbimento; i circuiti esterni hanno il compito di garantire la continuità dei flussi in ingresso ed in uscita dalla macchina. Il generatore è alimentato tramite acqua calda prodotta in un bollitore elettrico, avente 3 resistenze scaldanti da 10 kW ciascuna e dotato di un termostato con teleruttore, che agisce sulle resistenze una volta che l'acqua ha raggiunto la temperatura di esercizio; il circuito caldo è collegato ad un vaso di espansione che assorbe le dilatazioni termiche del fluido. Un primo layout dell'impianto prevedeva l'accumulo dell'acqua refrigerata in un serbatoio dedicato. Le prime prove sperimentali hanno messo in luce come la limitata capienza del serbatoio non permettesse il raggiungimento delle condizioni di stazionarietà a causa del progressivo raffreddamento di tutta l'acqua contenuta in esso. Si è quindi proceduto all'inserimento di un'utenza frigorifera, costituita da due ventilconvettori che consentono lo smaltimento della potenza frigorifera.

I flussi di acqua calda e fredda sono garantiti da due coppie di pompe gemellari: ciascuna pompa del circuito caldo può elaborare una portata di $3,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ a 2850 giri/min, con una prevalenza pari a 68,6 kPa; ciascuna pompa del circuito freddo può elaborare una portata di $3,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ a 2890 giri/min, con una prevalenza di 46,0 kPa.

Con lo schema proposto è possibile regolare la temperatura di alimentazione della macchina e quella dell'acqua di raffreddamento; è possibile inoltre regolare (parzializzare) le diverse portate dei fluidi dei circuiti esterni.

3.2) Strumentazione di misura e acquisizione dati

La strumentazione di misura dei parametri di funzionamento esterni della macchina è costituita da:

- termometri a pozzetto in ciascuno dei circuiti esterni della macchina (uno in ingresso ed uno in uscita) e nei serbatoi caldo e freddo;
- manometri su tutti i circuiti;
- tronchetti misuratori di portata collegati a trasduttori di pressione differenziale su ciascun circuito esterno della macchina;
- termoresistenze Pt 100 racchiuse in ceramica ed immerse in un bagno d'olio in appositi pozzetti per misure di temperatura nei circuiti esterni e all'interno della macchina, nell'evaporatore e nel condensatore;
- termocoppie di tipo J a fascetta, per la misura della temperatura delle soluzioni che circolano tra i vari componenti del gruppo frigorifero ed in particolare: le temperature della soluzione concentrata in uscita e della soluzione diluita in ingresso al generatore, della soluzione in ingresso e in uscita all'assorbitore.

Tutte le grandezze misurate sono convertite in segnali elettrici ed elaborate attraverso un sistema di acquisizione dati (field point); il software permette la visualizzazione e la memorizzazione dei parametri esaminati, con la possibilità di scelta della frequenza di acquisizione.

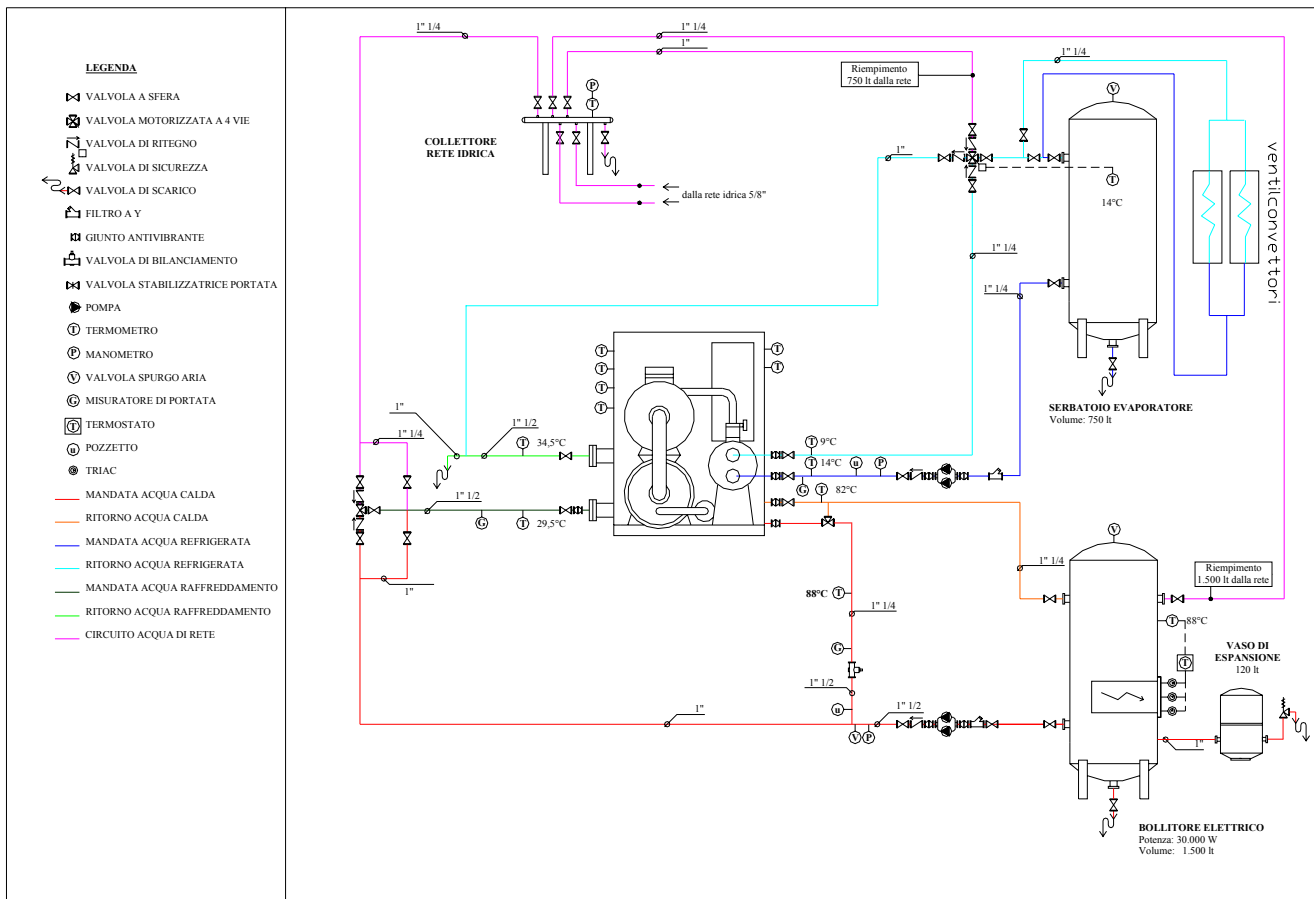


Figura 3: schema dell'apparato sperimentale.

Il flusso di dati dai punti di acquisizione dislocati nelle varie zone dell'impianto al sistema software di gestione ha reso necessario il collegamento elettrico dai sensori alle porte di ingresso dell'elaboratore; in qualche caso il cammino dei cavi si estende anche per alcuni metri, con inevitabile decremento del rapporto segnale/rumore. Pertanto, si è resa necessaria una correzione del segnale di ingresso al field point in funzione della distanza dal punto di acquisizione. In fig. 4 è riportata una schermata-tipo del software, durante il normale funzionamento dell'impianto.

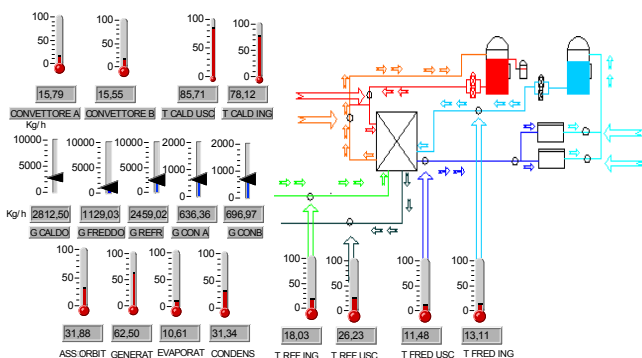


Figura 4: output istantaneo del sistema di acquisizione dati.

4) MISURE SPERIMENTALI

4.1) Condizioni di misura

La campagna sperimentale svolta si è incentrata sull'analisi del comportamento dell'impianto al variare della temperatura di alimentazione della sorgente calda.

La temperatura di ingresso dell'acqua di raffreddamento è stata considerata come una variabile indipendente in quanto l'acqua è stata inviata alla macchina direttamente dalla rete idrica. Tenendo fisse le portate su tutti i circuiti esterni e le velocità dei ventilconvettori, si sono monitorati tutti gli altri parametri dipendenti di funzionamento. In tab. 1 sono riportati i valori fissi delle grandezze in gioco.

Tabella 1: parametri di funzionamento fissi della macchina ad assorbimento.

T sorgente calda	70-90 °C
T ingresso acqua di raffreddamento	15-20 °C
Portata circuito raffreddamento	1 kg/s
Portata circuito caldo	1,1 kg/s
Portata circuito freddo	0,9 kg/s
Velocità motore ventilconvettori	3 (max)

4.2) Modalità di misura

Le prove preliminari, realizzate per la verifica del funzionamento del gruppo frigorifero, hanno evidenziato il raggiungimento delle condizioni di stazionarietà entro circa 60-70 minuti dall'accensione della macchina. Tuttavia, ogni prova si è prolungata per circa 6 ore allo scopo di evidenziare eventuali fluttuazioni dei parametri termodinamici con il protrarsi del funzionamento. Il sistema di acquisizione dati è stato regolato con una frequenza di acquisizione dati che è il risultato di un compromesso fra alleggerimento della catena strumentale e precisione del monitoraggio. In particolare, ogni grandezza è acquisita ad intervalli di 1,5 secondi e memorizzata ogni 10 minuti, con visualizzazione in tempo reale del valore istantaneo (fig. 4) e dell'andamento nel tempo di ogni parametro (fig. 5).

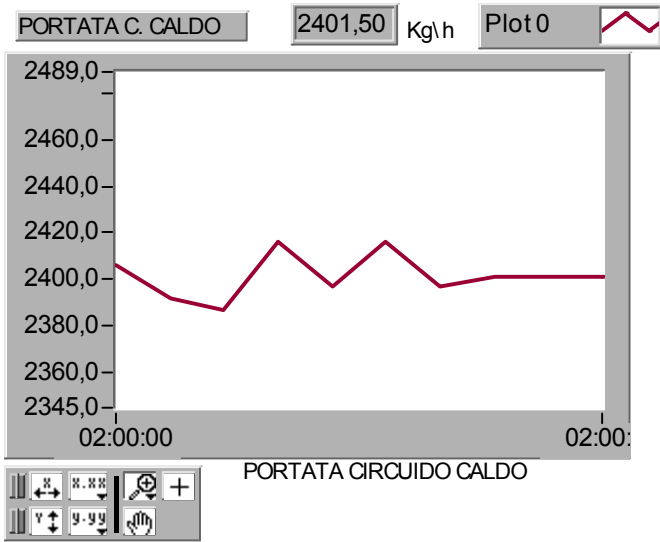


Figura 5: output grafico del sistema di acquisizione dati.

5) RISULTATI

5.1) Analisi dei dati

I risultati delle misure sperimentali, condotte al variare della temperatura di alimentazione della macchina, sono stati elaborati in condizioni stazionarie; a titolo di esempio la tab. 2 riporta i risultati relativi ai parametri dei circuiti esterni.

Tabella 2: risultati delle misure realizzate al variare della temperatura di alimentazione della sorgente calda.

TEMPERATURE					
$T_{cal,ing}$	$T_{cal,usc}$	$T_{fre,ing}$	$T_{fre,usc}$	$T_{ref,ing}$	$T_{ref,usc}$
80,7	76,0	11,6	8,5	17,6	26,9
76,9	73,1	14,0	11,2	19,7	27,1
72,4	69,1	14,2	11,2	17,6	24,8
67,3	65,0	15,3	12,6	18,5	23,9
PORTATE					
$T_{cal,ing}$	G_{cal}	G_{fre}	G_{ref}		
80,7	0,99	0,37	0,65		
76,9	1,04	0,37	0,66		
72,4	1,00	0,36	0,65		
67,3	0,99	0,37	0,65		

Le grandezze riportate sono le seguenti::

- $T_{cal,ing}$: temperatura dell'acqua all'ingresso del generatore [°C];
- $T_{cal,usc}$: temperatura dell'acqua all'uscita del generatore [°C];
- $T_{fre,ing}$: temperatura dell'acqua all'ingresso dell'evaporatore [°C];
- $T_{fre,usc}$: temperatura dell'acqua all'uscita dell'evaporatore [°C];
- $T_{ref,ing}$: temperatura dell'acqua all'ingresso dell'assorbitore e del condensatore [°C];
- $T_{ref,usc}$: temperatura dell'acqua all'uscita dell'assorbitore e del condensatore [°C];
- G_{cal} : portata del circuito caldo [kg/s];
- G_{fre} : portata del circuito freddo [kg/s];
- G_{ref} : portata del circuito di refrigerazione [kg/s];
- T_{amb} : temperatura ambiente [°C];

Nelle figg. 6 e 7 sono evidenziati in forma grafica gli andamenti delle temperature del generatore e dell'evaporatore, in funzione della temperatura di alimentazione.

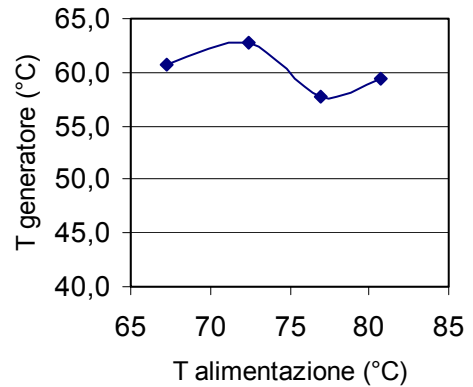


Figura 6: variazione della temperatura del generatore in funzione della temperatura di alimentazione.

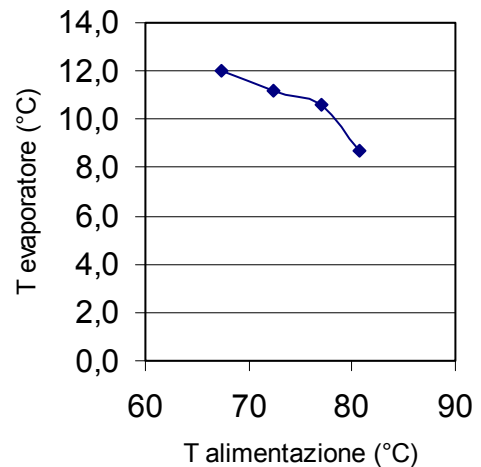


Figura 7: variazione della temperatura dell'evaporatore in funzione della temperatura di alimentazione.

Il solo parametro soggetto a variazioni significative è la temperatura dell'evaporatore che, come è lecito attendersi, decresce sensibilmente all'aumentare della temperatura di alimentazione. La temperatura al generatore non risente invece in maniera significativa della temperatura di alimentazione.

5.2) Calcolo delle prestazioni della macchina

La prima validazione della catena di misura è consistita nella verifica del primo principio della termodinamica:

$$Q_{ass} + Q_{con} = Q_{ev} + Q_{gen} \quad (1)$$

in cui, nell'ipotesi di rendimento degli scambiatori interni alla macchina pari a 1, si ha:

- $Q_{gen} = G_{cal} \gamma (T_{cal,ing} - T_{cal,usc})$
- $Q_{ev} = G_{fre} \gamma (T_{fre,ing} - T_{fre,usc})$
- $Q_{ass} + Q_{con} = G_{ref} \gamma (T_{ref,usc} - T_{ref,ing})$

con γ calore specifico dell'acqua.

L'equazione (1) risulta soddisfatta a meno di un errore non superiore al 5% rispetto al calore in ingresso al generatore Q_g .

E' stata poi valutata la variazione della resa frigorifera con la temperatura di alimentazione; il grafico è riportato in fig. 8.

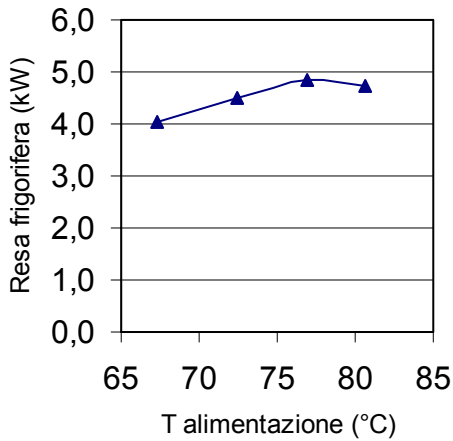


Figura 8: variazione della resa frigorifera in funzione della temperatura di alimentazione.

L'effetto utile della macchina è valutato secondo la relazione seguente:

$$\xi = \frac{Q_{ev}}{Q_{gen}}$$

Il rendimento energetico è calcolato secondo la relazione:

$$\eta_{ex} = \frac{Q_{ev} \left(\frac{T_{amb}}{T_{ev}} - 1 \right)}{Q_{gen} \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{boiler}} \right)}$$

Nelle figg. 9 e 10 sono riportati gli andamenti rispettivamente di ξ ed η in funzione della temperatura di alimentazione. La fig. 11 riporta i punti di funzionamento sperimentali ottenuti sul diagramma P-T-X della soluzione H₂O-LiBr, relativamente alle condizioni di maggior effetto utile tra quelle indagate.

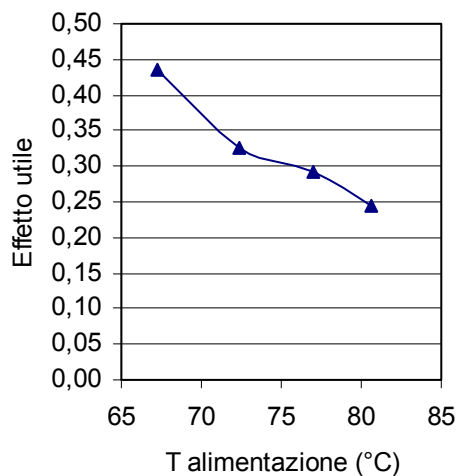


Figura 9: variazione dell'effetto utile in funzione della temperatura di alimentazione.

I dati di targa forniti dal costruttore indicano un effetto utile alle condizioni nominali pari a 0,60 mentre da misure effettuate da altri autori [13] sulla macchina dello stesso modello, con temperature di alimentazione simili, si sono

riscontrati valori di ξ paragonabili ($\xi = 0,32$ per $T_{cal,ing} = 80^\circ\text{C}$).

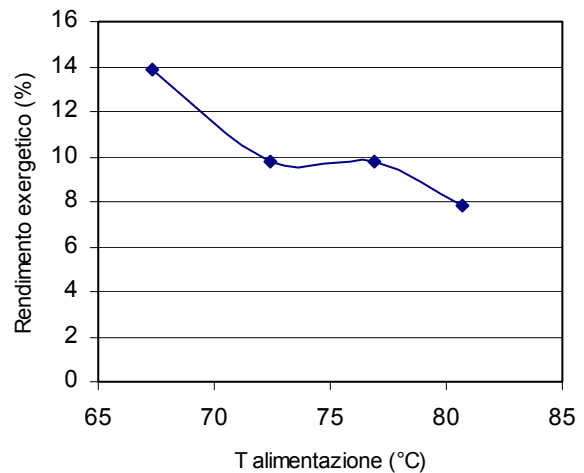


Figura 10: variazione del rendimento exergetico in funzione della temperatura di alimentazione.

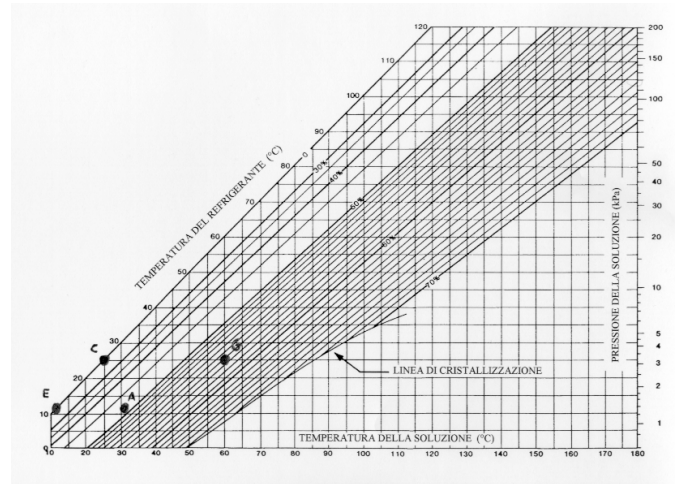


Figura 11: punti di funzionamento della macchina sul diagramma P-T-X della soluzione Acqua-Bromuro di Litio.

L'analisi delle prestazioni mostra come, una volta superato la temperatura di alimentazione minima di innesco (67 °C), al crescere di quest'ultima, pur aumentando la resa frigorifera, peggiori l'efficienza della macchina, sia in termini di effetto utile che di rendimento exergetico.

6) CONCLUSIONI

E' stato realizzato un apparato sperimentale per lo studio di un gruppo frigorifero ad assorbimento; dopo la prima fase di messa a punto dell'impianto si è avviata una campagna sperimentale che si è focalizzata sull'analisi del comportamento dell'impianto al variare della temperatura di alimentazione della sorgente calda. I risultati hanno evidenziato il comportamento ottimale della macchina a temperature vicine a 70°C, indicando la possibilità di alimentare l'impianto anche attraverso l'accoppiamento con pannelli solari.

Gli sviluppi futuri della ricerca si incentreranno su nuove campagne sperimentali per l'indagine del comportamento della

macchina al variare di altri parametri quali, ad esempio, le portate dei circuiti esterni o la temperatura di raffreddamento. Inoltre, è previsto il confronto con modelli di calcolo previsionali, sia reperibili in letteratura, sia elaborati ad hoc, allo scopo di minimizzare gli oneri della sperimentazione.

7) LISTA DEI SIMBOLI

T	= temperatura	[°C];
G	= portata volumetrica	[m ³ /s];
Q	= calore	[J];
γ	= calore specifico	[J/kgK];
ξ	= effetto utile	[-];
η	= rendimento	[-].

Pedici

ing	= ingresso;
usc	= uscita;
cal	= caldo;
fre	= freddo;
ref	= refrigerante;
amb	= ambiente;
ev	= evaporatore;
con	= condensatore;
ass	= assorbitore;
gen	= generatore;
ex	= exergetico.

8) BIBLIOGRAFIA

1. S. Grignaffini e F. Asdrubali, I fluidi per macchine ad assorbimento: requisiti e bibliografia recente, VII European Conference on Technological Innovations in Refrigeration, in Air Conditioning and in the food industry into the third millenium, Politecnico di Milano, 18-19 giugno 1999.
2. G. Moncada Lo Giudice, F. Asdrubali, e C. Buratti, Misura di alcune proprietà fisiche della soluzione Alcool Metilico-Cloruro di Calcio, 46° Congresso Nazionale ATI, Gaeta, settembre 1991.
3. G. Moncada Lo Giudice, F. Asdrubali e C. Buratti, Influenza del rapporto molare fra i sali sulle prestazioni delle miscele ternarie Alcool Metilico- Sali, 48° Congresso Nazionale ATI, Taormina, settembre 1993.
4. F. Asdrubali, C. Buratti e L. Santarpia, Proprietà termofisiche di soluzioni acquose di idrossidi, 48° Congresso Nazionale ATI, Taormina, settembre 1993.
5. F. Cotana, F. Asdrubali e L. Santarpia, Thermophysical properties of H₂O-NaOH-KOH mixture, International Conference "CFC - The Day After", Padova, settembre 1994.
6. C. Buratti, F. Asdrubali e G. Chiari, Misura del calore di soluzione di fluidi per sistemi ad assorbimento, XV Congresso Nazionale sulla Trasmissione del calore - UIT, Torino, 19-20 giugno 1997.
7. M. Felli, F. Cotana e F. Asdrubali, Design and Performances of a two Stages Heat Transformer, XVIII International Congress of Refrigeration, Montreal, agosto 1991.
8. F. Asdrubali, C. Buratti e L. Santarpia, Prestazioni della miscela ternaria CH₃OH-LiBr-ZnCl₂ in pompe e trasformatori di calore, Il Freddo anno 46 n. 6,

novembre-dicembre, 1992.

9. F. Asdrubali, C. Buratti e A. Milone, Ottimizzazione exergetica di una macchina frigorifera ad assorbimento, 51° Congresso Nazionale ATI, Udine 16 - 20 settembre 1996.
10. M. Coppi e A. de Lieto Vollaro, Progettazione e realizzazione di una macchina frigorifera a doppio stadio ad H₂O-LiBr per basse temeperature, ed. ESA, dicembre 1990.
11. M. Coppi e A. de Lieto Vollaro, An experimental two-stage low-temeprature cooled generating absorption-type machine, II International Congress Energy, Environment and Technological Innovation, Roma, 1992.
12. Mauro Felli, Lezioni di fisica tecnica, Morlacchi Editore, Perugia 1999.
13. K. Sumathy, Z. C. Huang e Z.F. Li, Solar absorption cooling with low grade heat source - A strategy of development in south China, *Solar energy*, vol. 72, pp. 152-165, 2002.