



Cambiamenti climatici: i ghiacciai si ritraggono, l'acqua diminuisce, i raggi solari intrappolati aumentano l'effetto serra



REFRIGERAZIONE MAGNETICA A TEMPERATURA AMBIENTE: UN'APPLICAZIONE PER IL CONDIZIONAMENTO DELL'ARIA

**L. A. TAGLIAFICO
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA**

REFRIGERATORI MAGNETICI A TEMPERATURA AMBIENTE: UN'APPLICAZIONE PER IL CONDIZIONAMENTO DELL'ARIA

Luca A. Tagliafico*, Federico Scarpa

Università degli studi di Genova – DIME/TEC – Sezione di Termo Energetica e Condizionamento ambientale, Via All'Opera Pia 15A, 16145 Genova - ITALY

E-mail: tgl@ditec.unige.it - Fax +39010311870

Sommario

In questi ultimi anni la refrigerazione magnetica a temperatura ambiente (RTMR) è stata spesso proposta per applicazioni di condizionamento ambientale, promettendo di essere un'alternativa interessante ai sistemi di refrigerazione a compressione di vapore.

In questo lavoro un modello termodinamico in condizioni stazionarie è impiegato per studiare il comportamento di un frigorifero magnetico di tipo "Steyert" (rotante), con l'impiego di una matrice porosa di materiale magneto-calorico (gadolinio). Nonostante la semplicità del modello termo-fluidodinamico e magnetico, la configurazione Steyert mantiene tutti i principali aspetti dei frigoriferi magnetici ai fini dell'analisi di sensitività delle prestazioni del sistema al variare dei parametri di progetto e delle condizioni di funzionamento.

Il lavoro evidenzia le possibilità ed i limiti di applicazione di questa tecnologia agli impianti di climatizzazione. Vengono inoltre presentati alcuni parametri prestazionali e le problematiche ancora aperte.

Introduzione

La refrigerazione magnetica è una tecnologia che sfrutta una proprietà intrinseca dei materiali Magneto-sensibili detta effetto magneto-calorico (MCE). L'MCE è la capacità del materiale di aumentare (o diminuire) la sua temperatura al "bulk" quando si verifica un aumento (o una diminuzione) del campo magnetico esterno applicato B , in condizioni adiabatiche (uno schema qualitativo di tale effetto è mostrato in figura 1, con riferimento a due linee di campo magnetico costante B nel diagramma T-S).

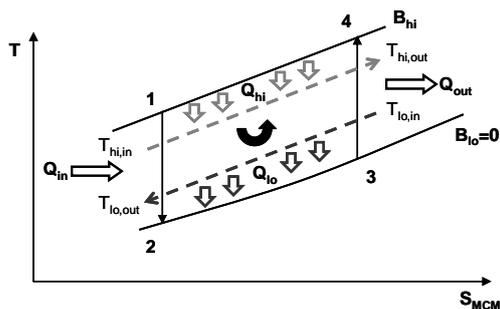


Figura 1 – Ciclo Brayton nel piano T-S, lungo curve a campo magnetico costante B . L'andamento qualitativo delle temperature del fluido termovettore è riportato con linea tratteggiata senza alcun riferimento all'asse S.

Scoperto da P. Weiss ed A. Piccard nel 1917 [1], questo salto di temperatura di adiabatica ΔT_{ad} è stato visto per la prima volta per la prima verifica delle potenziali applicazioni alla temperatura ambiente nel 1976 da Brown [2], che ha realizzato un primo prototipo con l'uso del principio del rigeneratore magnetico attivo (AMR). Il processo rigenerativo è il nucleo della tecnologia della refrigerazione magnetica, perché aumenta di molte volte la grandezza del MCE mostrato dai materiali attualmente conosciuti ($\sim 3^\circ\text{C}$ per variazioni applicate di $B=1$ Tesla).

Progettando una corretta sequenza di variazioni del campo magnetico B e dei processi di scambio termico ad esso associati, il frigorifero magnetico può garantire il raffreddamento continuo su intervalli di temperatura di diversi gradi, come mostrato nella Figura 1.

Un frigorifero magnetico impiega un refrigerante solido accoppiato ad un fluido termovettore comune (acqua), senza necessità di usare i fluidi refrigeranti HCFC e nessuna necessità di impianti ad alta pressione (tipo con ammoniaca o anidride carbonica). Ciò riduce l'effetto potenziale sull'ozono e sul riscaldamento globale diretto praticamente a zero. Altri vantaggi sono il funzionamento silenzioso ed il semplice sistema di controllo. Tuttavia, la sfida per

realizzare un efficace frigorifero magnetico con prestazioni e costi competitivi rispetto alle tradizionali tecniche di refrigerazione non è affatto semplice. La letteratura riporta molti prototipi RTMR sviluppati e costruiti sia come prova del principio di funzionamento, sia con scopi orientati al miglioramento delle prestazioni. Svariate idee e configurazioni molto diverse tra loro sono disponibili in letteratura, una vasta serie di prototipi e di sezioni di prova conosciute in letteratura è riportata in Scarpa et al. (2012) [3].

In questo lavoro un modello termodinamico in condizioni stazionarie è impiegato per studiare il comportamento di un frigorifero magnetico di tipo “Steyert” (rotante), operante vicino alla temperatura ambiente, con l’impiego di una matrice porosa di materiale magneto-calorico (gadolinio). L’indagine si concentra sull’influenza che i parametri progettuali del modello hanno sulle prestazioni globali del dispositivo, mantenendo costanti le variabili magnetiche ed i vincoli operativi (temperature di lavoro, geometria, etc.). Il lavoro evidenzia le possibilità ed i limiti di applicazione di questa tecnologia agli impianti di climatizzazione. Vengono inoltre presentati alcuni parametri prestazionali e discusse le problematiche ancora aperte.

2. Il Refrigeratore Magnetico di Tipo Steyert

Nella configurazione rotativa di tipo Steyert [4] la rotazione del materiale magneto-calorico è continua ed il fluido termovettore fluisce costantemente in controcorrente, come indicato

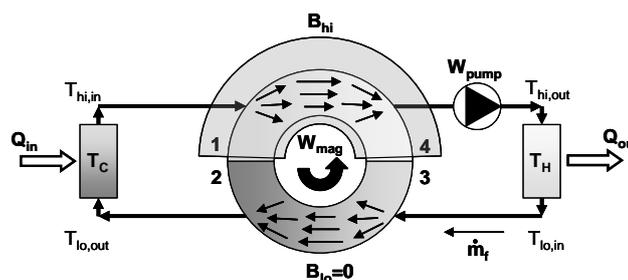


Figura 2 – Disegno schematico di un refrigeratore magnetico tipo Steyert. Il circuito fluido esterno sfrutta l’MCE del gruppo centrale di dischi di gadolinio rotanti

nella Figura 2. La macchina sviluppa una rigenerazione termica e magnetica (AMR), dando origine ad alta efficienza di un ciclo termodinamico equivalente al ciclo di Ericsson riportato in Figura 1. L’uso dell’AMR offre alti valori della differenza di temperatura (conosciuta solitamente come ΔT_{span}) fra la sorgenti calde e fredde del ciclo di refrigerazione, anche quando l’effetto magnet-calorico di base (ΔT_{AD}) è di soli pochi gradi. Un modello dettagliato dell’intero sistema è

riportato in [5], evidenziando la dipendenza delle variabili di prestazione (capacità di raffreddamento Q_{in} , consumo di energia $W_{tot} = W_{pum} + con$, $COP = Q_{in}/W_{tot}$) dalle variabili operative (ΔT_{span} ; ΔT_{AD} ; campo magnetico B , e così via).

Uno dei parametri di funzionamento più cruciali è il rapporto tra le capacità di flusso termico delle correnti fluide (TCR – Thermal Capacity Ratio). L’entità della portata massica del fluido dipende dalla natura del fluido impiegato e dalla portata massica del solido. Poiché il rigeneratore è modellato come uno scambiatore in controcorrente, la migliore efficienza si ottiene se le capacità di flusso termico delle due correnti fluide circolanti sono ben bilanciate: il TCR è quindi definito nella forma: $TCR = \frac{\dot{m}_f \cdot c_f}{\dot{m}_{MCM} \cdot c_{MCM}}$. Tale parametro può

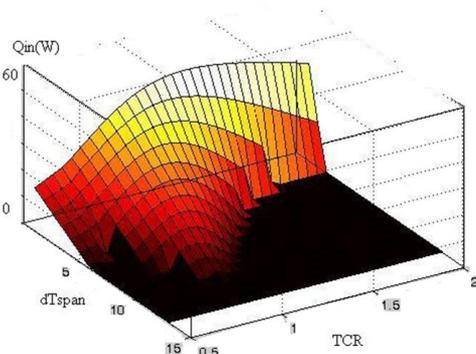


Figura 3 – Potenza frigorigena $Q_{in}(W)$ di un refrigeratore magnetico con acqua, al variare di ΔT_{span} e TCR.

essere utilizzato per calcolare il corretto valore della portata massica del fluido per una determinata portata massica del solido (matrice porosa rotante). Se TCR è uguale all’unità, lo scambio termico all’interno del rigeneratore sarà perfettamente bilanciato.

Ad esempio se la portata di massa solida è di 0,2 kg/s (a seconda della massa di gadolinio e della velocità di rotazione del rigeneratore), la portata di massa corrispondente del fluido termovettore deve essere di circa 0,01 kg/s, se si utilizza l'acqua come fluido termovettore, o circa 0,5 kg/s se invece si usa l'aria. L'influenza reciproca di TCR e ΔT_{span} (per dato materiale, ΔT_{AD} , campo magnetico B e geometria della macchina) è evidenziata per il caso dell'acqua nella Figura 3, ove il forte effetto sulla capacità di raffreddamento Q_{in} è riportato in funzione di TCR e ΔT_{span} .

3. Potenziale Applicazione al Condizionamento dell'aria

Le condizioni di scambio termico all'interno del rigeneratore AMR sono cruciali. È indispensabile un grade coefficiente di scambio termico tra il fluido ed il solido (il rapporto tra il flusso di calore rigenerativo e la capacità di raffreddamento raggiunge fattori di moltiplicazione fino a 20 volte per un ΔT_{span} di 10°C, funzionamento con acqua), ma è necessario anche uno scambiatore di calore ben bilanciato, per ottenere grandi gradienti di temperatura in brevissime distanze. Per soddisfare

questi requisiti una configurazione in circuito idraulico chiuso come quella mostrata nella Figura 4 può essere ben adattabile per le applicazioni di climatizzazione. Il frigorifero magnetico RTMR sviluppa il ciclo inverso, mentre gli scambiatori di calore esterni smaltiscono il calore all'ambiente esterno sul lato caldo ed assorbono il calore dall'ambiente refrigerato dall'altro lato (nella UTA / ATU, unità di trattamento dell'aria). Nella disposizione definita dalla Figura 5 (a sinistra), il RTMR agisce come un "chiller". Si tratta di un impianto molto semplice per aria condizionata, che impiega soltanto uno scambiatore di calore di raffreddamento nell'unità di trattamento dell'aria. Il flusso di aria proveniente dagli ambienti condizionati nelle condizioni (A) viene in parte smaltito all'aperto ed in parte ricircola nel ciclo di raffreddamento. Dopo la miscelazione con la nuova aria introdotta dall'esterno nelle condizioni (E) la portata totale in condizioni (M) viene trattata nel ATU, per raggiungere lo stato desiderato (B) all'ingresso dell'ambiente. Solo per fare un esempio di una possibile applicazione, in questo caso c'è una sola unità di raffreddamento.

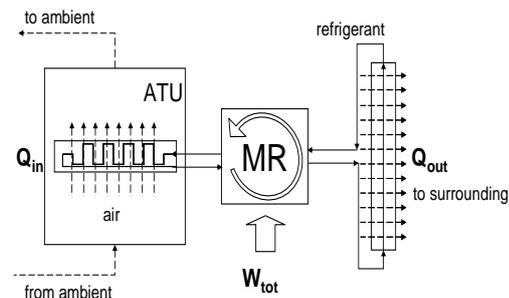


Figura 4 – Disegno schematico di un RTMR applicato all'aria condizionata. Linee tratteggiate e frecce indicano i flussi d'aria, le linee continue rappresentano i flussi del fluido termovettore (aria o acqua).

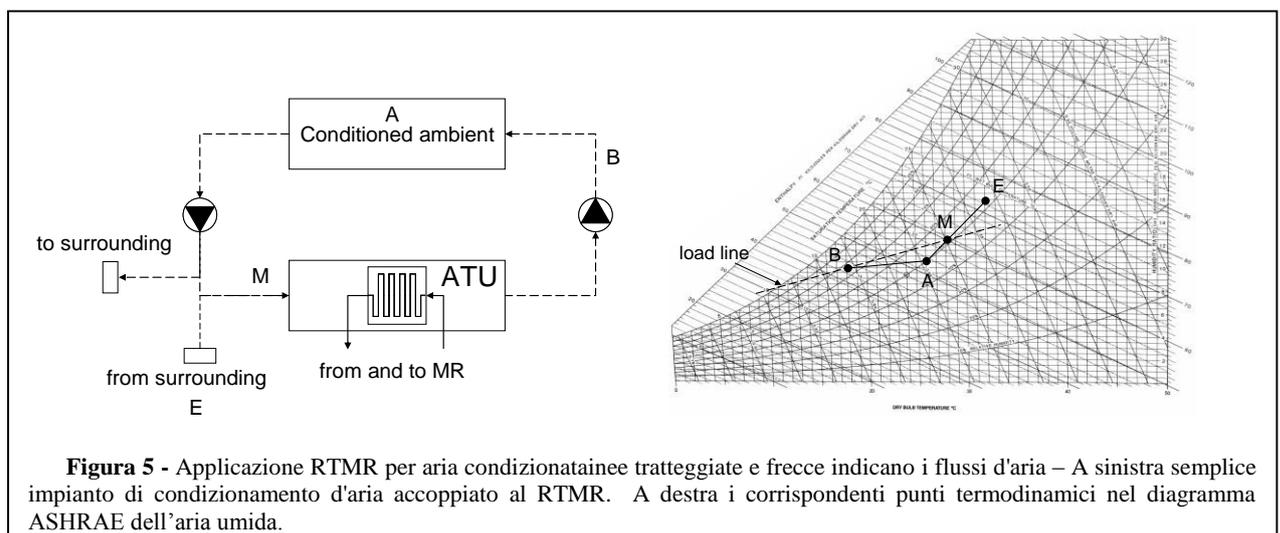


Figura 5 - Applicazione RTMR per aria condizionata. A sinistra semplice impianto di condizionamento d'aria accoppiato al RTMR. A destra i corrispondenti punti termodinamici nel diagramma ASHRAE dell'aria umida.

Questa ATU di raffreddamento potrebbe essere collegata al nostro refrigeratore magnetico RTMR, che svolgere la funzione dello scambiatore di calore freddo, come mostrato nella Figura 5 a sinistra. Le trasformazioni dell'aria nell'impianto qui descritto sono riportate nel diagramma psicometrico ASHRAE nella Figura 5 a destra. La condizione desiderata per l'ambiente si trova nel punto A nella tabella psicometrica. La condizione esterna è identificata dal punto E. Lo stato della miscela all'ingresso di ATU si trova sulla linea che collega i punti A ed E ed è identificata dal punto M. La condizione dell'aria che entra nell'ambiente è identificata dal punto B che si trova sulla linea di carico (definita dal rapporto tra il carico di calore sensibile e quello totale) e ha una temperatura $T_B = 6 \div 10 \text{ }^\circ\text{C}$ in meno della temperatura ambiente T_A . La serpentina di raffreddamento (cioè il RTMR) forza l'aria a raffreddarsi dal punto M al punto B. Deve assorbire il flusso termico da smaltire sarà pari al prodotto della portata massica dell'aria che attraversa il ATU e la differenza di entalpia tra i punti M e B. Ad esempio, una tipica applicazione estiva dovrebbe avere una temperatura ambiente $T_A = 26 \text{ }^\circ\text{C}$, una temperatura esterna $T_e = 33 \text{ }^\circ\text{C}$ e la temperatura dell'aria che entra nell'ambiente condizionato $T_B = 18 \text{ }^\circ\text{C}$.

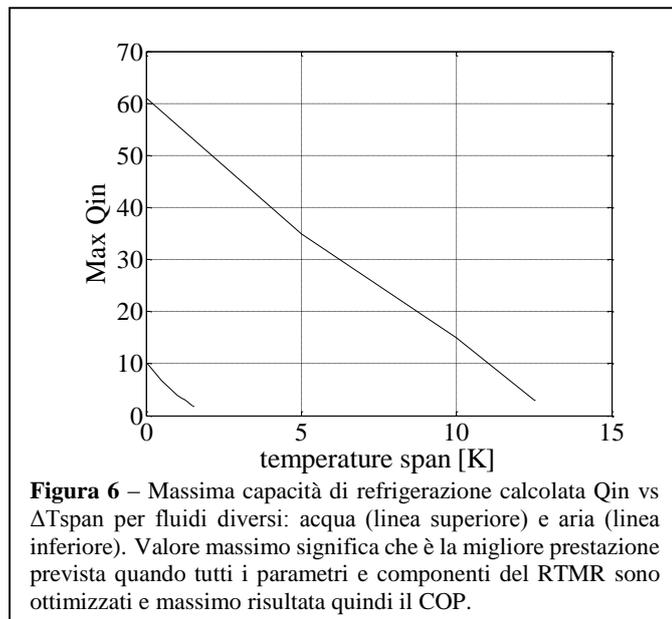
Guardando il diagramma, si nota come questi dati chiedono al RTMR di operare su un $\Delta T_{\text{span}} = T_M - T_B$, che raggiunge come minimo il valore corrispondente a $\Delta T_{\text{span}} = T_A - T_B = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ (senza alcun rinnovo dell'aria).

Per calcolare le prestazioni del RTMR di Steyert è stato utilizzato il già citato programma di calcolo [5], supponendo note la massa del gadolinio e le condizioni di funzionamento, supponendo di voler utilizzare l'aria o l'acqua come fluido termovettore. I risultati in termini di capacità di raffreddamento Q_{in} e di ΔT_{span} sono riportati in figura 6.

È facile identificare due punti significativi nel diagramma di Figura 6: una condizione di lavoro a carico termico refrigerante nullo ($Q_{in} = 0$, $\Delta T_{\text{span}} \text{ max}$) e una condizione di lavoro a capacità refrigerante massima ($\Delta T_{\text{span}} = 0 \text{ }^\circ$, $Q_{in} \text{ max}$). Questi due punti sintetizzano i limiti di funzionamento e descrivono il potenziale di un RTMR, poichè sono collegati da una linea quasi rettilinea.

Le prestazioni con acqua o aria si trovano quasi su due rette parallele, con la linea dell'acqua che mostra una capacità frigorifera massima circa sei volte maggiore di quelle dell'aria. Ciò è dovuto alla maggiore efficacia di scambio termico dell'acqua rispetto all'aria, all'interno del rigeneratore AMR. Entrambe le linee mostrano che la capacità Q_{in} diminuisce fortemente se la temperatura ΔT_{span} aumenta. In particolare nel caso dell'aria un salto di temperatura tra sorgenti calda e fredda superiore a $2 \text{ }^\circ\text{C}$ rende il RTMR completamente inutile. L'acqua è dunque il fluido termovettore da preferire. Con acqua il RTMR può raggiungere un ΔT_{span} di circa $13 \text{ }^\circ\text{C}$, che è tuttavia ancora troppo piccole per soddisfare i vincoli di salto di temperatura della nostra applicazione.

In conclusione, la semplice applicazione di condizionamento dell'aria presentata in questo lavoro (Figura 5) non può essere sviluppata con il semplice frigorifero magnetico rotativo tipo Steyert qui studiato, indipendentemente dai carichi termici refrigeranti richiesti. Infatti il salto di temperatura richiesto (dell'ordine di $\Delta T_{\text{span}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) è troppo alto per il campo magnetico scelto ($B = 0,8 \text{ Tesla}$) applicato al materiale magneto-calorico gadolinio qui utilizzato.



La semplice soluzione di aumentare la massa del MCM (per aumentare la potenza del refrigeratore) non è utile per superare questo limite, a causa dei vincoli sui salti di temperatura ΔT_{span} imposti. Le soluzioni potenziali per migliorare le prestazioni previste di questo modello di RTMR tipo Steyert sono:

- incremento dello scambio all'interno del rigeneratore (modifica della geometria, ad esempio una matrice porosa di MCM, o una disposizione a piastre alettate o con superfici scabre);
- scelta (o scoperta) di un migliore MCM con maggior MCE, anche con differenti temperature di transizione di Curie (ad esempio perovskiti) da usare in serie all'interno del AMR;
- aumento del campo magnetico B disponibile (migliore progettazione dei magneti permanenti e magneti di terre rare o loro combinazione più appropriata).

Ovviamente le possibilità di cambiare la configurazione di un RTMR sono molto diverse tra loro, sempre alla ricerca di soluzioni più efficienti e funzionali: è stato questo il lavoro della ricerca nell'ultimo decennio, con un gran numero di nuovi prototipi proposti e sviluppati [3,6].

4. Conclusioni

Un modello termodinamico stazionario di un frigorifero magnetico a temperatura ambiente di tipo Steyert (RTMR) è stato utilizzato per prevedere le prestazioni teoriche che un RTMR può garantire in tutto il suo campo di applicazione, con particolare riferimento all'applicazione per un semplice sistema di refrigerazione per aria condizionata.

Nonostante le prestazioni previste siano state ottimizzate rispetto ai parametri di progettazione e ai parametri di funzionamento, al fine di ottenere prestazioni massime (in termini di capacità di raffreddamento Q_{in} e ΔT_{span}) le migliori prestazioni previste dal modello offrono 60 W di potenza refrigerante in condizioni di ΔT_{span} , nullo ed un ΔT_{span} di circa 13 °C nella condizione di "No-Load" ($Q_{in}=0$).

La prestazione di cui sopra non è ancora sufficiente per l'applicazione esaminata, tipica di un problema di aria condizionata estivo, che richiede ragionevolmente un salto di temperatura ΔT_{span} di almeno 20 °C. Il miglioramento dei diversi aspetti costruttivi e funzionali coinvolti nella RTMR (magnetici, materiali, scambio termico, etc.) promette possibilità di ampliare il campo di applicazione dei frigoriferi magnetici.

In conclusione la tecnologia della refrigerazione magnetica a temperatura ambiente costituisce un campo di ricerca di sicuro interesse, con possibilità di crescita e molti aspetti interdisciplinari che lasciano molto spazio al miglioramento delle prestazioni, rendendo possibili applicazioni future anche nel campo dell'aria condizionata.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato sviluppato con il finanziamento dell'Università degli Studi di Genova e nell'ambito del progetto PRIN 2015, MIUR grant 2015M8S2PA "Clean Heating and Cooling Technologies for energy efficient smart grid".

Bibliografia

- [1] Weiss, P., Piccard, A., 1917. *Le phénomène magnétocalorique*. J. Phys. Theor. Appl., 7 (1), 103–109.
- [2] Brown, G.V., 1976. *Magnetic heat pumping near room temperature*, J. Appl. Phys. 47, 3673-3680.
- [3] Scarpa, F., Tagliafico, G., Tagliafico, L.A., 2012. *Classification proposal for room temperature magnetic refrigerators*. Int. J. Refrigeration 35(2), 453-458.
- [4] Steyert, W.A., 1978. *Stirling cycles rotating magnetic refrigerators and heat engines for use near room temperature*. J. Appl. Phys. 49, 1217-1226.
- [5] Tagliafico, L.A., Scarpa, F., Canepa, F., Cirafici, S., 2006. *Performance analysis of a room temperature rotary magnetic refrigerator for two different gadolinium compounds*. Int. J. Refrigeration, 29 (8), 1307-1317.
- [6] Yu, B.a , Liu, M.a, Egolf, P.W.b, Kitanovski, A.; *A review of magnetic refrigerator and heat pump prototypes built before the year 2010* International Journal of Refrigeration Volume 33, Issue 6, September 2010, Pages 1029-1060

