

# REFRIGERAZIONE MAGNETICA A TEMPERATURA AMBIENTE: 60 ANNI DI RICERCA E DI SVILUPPO TECNOLOGICO

**Luca A. Tagliafico, Federico Scarpa**  
**DIME/TEC – Università di Genova**  
**tgl@dittec.unige.it, federico.scarpa@unige.it**

## SOMMARIO

Il lavoro presenta brevemente lo stato dell'arte sulla refrigerazione magnetica a temperatura ambiente e porta in discussione i limiti che ancora ne ostacolano la diffusione sul mercato della refrigerazione come valida alternativa ai sistemi tradizionali a compressione di vapore.

## DISCUSSIONE

La refrigerazione magnetica sfrutta l'effetto magnetocalorico (MCE), cioè il cambiamento di entropia che alcuni materiali manifestano quando viene loro applicato un campo magnetico, con conseguente allineamento dei dipoli magnetici ed il riassetto degli atomi al loro interno. In condizioni isoterme l'effetto MCE si traduce in un cambiamento (isotermo) di entropia,  $\Delta S_T$ , evidenziato sperimentalmente da uno scambio termico. In condizioni adiabatiche l'applicazione di un campo magnetico determina invece una variazione di temperatura, sostanzialmente isoentropica,  $\Delta T_s$ . Questo fenomeno fisico può essere utilizzato per progettare un refrigeratore magnetico (MR).

Il principio di funzionamento di un MR, che diventa RTMR (Room Temperature Magnetic Refrigerator) quando opera nell'intorno della temperatura ambiente, è illustrato nella Figura 1, confrontandolo con le fasi corrispondenti di un ciclo inverso a gas a compressione.

I componenti principali di un RTMR vanno progettati per sviluppare, con una perfetta sincronizzazione, tutti i processi schematizzati in Figura 1:

- 1) Gli scambiatori di calore alle temperature superiori ed inferiori del ciclo refrigerante;
- 2) Il cuore del MCM, normalmente realizzato nella forma di un letto poroso di gadolinio con funzioni anche di rigeneratore (AMR). Il rigeneratore deve essere ciclicamente magnetizzato e smagnetizzato, mentre scambia contemporaneamente calore alternativamente con il fluido (generalmente acqua) freddo e caldo della macchina;
- 3) Il magnete, che deve essere realizzato con magneti permanenti Neodimio-Ferro-Boro (NdFeb) e produrre campi magnetici molto elevati (circa 1 Tesla)
- 4) Il sistema di misura e controllo, in grado di guidare correttamente, mediante l'uso di valvole a tre vie, il flusso di fluido attraverso ciascun componente attivo della macchina.

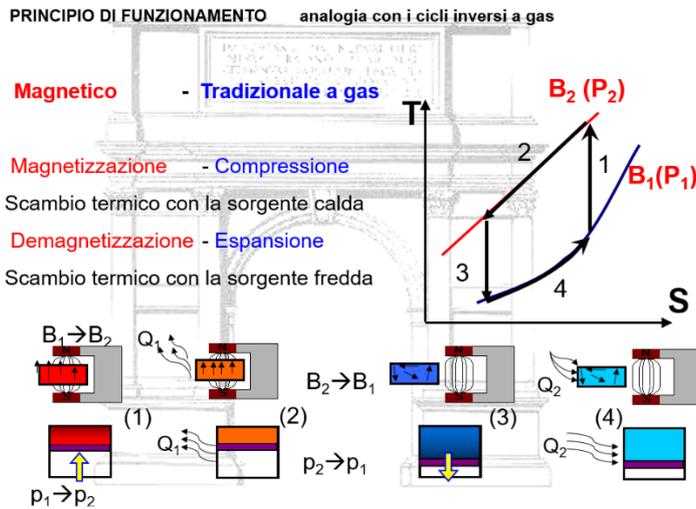


Figura 1. Principio di funzionamento di un refrigeratore magnetico e confronto con un ciclo base inverso a gas. Con l'avvento dei materiali aventi MCE a temperatura ambiente (gadolinio o materiali simili alle terre rare) il refrigeratore magnetico può operare anche a temperatura ambiente (RTMR).

Nell'ultima decade c'è stato un grande fiorire di attività di ricerca e sviluppo per i RTMR, prevalentemente mirati alla costruzione di macchine competitive per applicazioni di condizionamento dell'aria. Tuttavia alcune difficoltà sui materiali e di tipo economico ancora ostacolano l'ingresso sul mercato degli impianti basati su questa tecnologia, il cui potenziale in termini di prestazioni e di riduzione dell'impatto ambientale è molto alto [1].

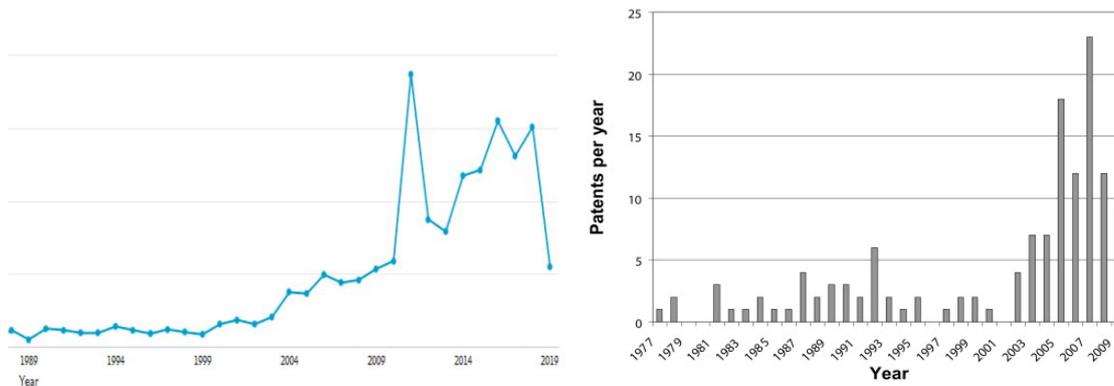


Figura 2. Numero di pubblicazioni sulla refrigerazione magnetica dal 1989 (fonte: Scopus) e numero di brevetti all'anno per refrigeratori magnetici ed a pompa di calore in grado di operare nell'intorno della temperatura ambiente (periodo: 1976–2009).

Le prestazioni attese da sistemi basati su rigeneratori in gadolinio o materiali simili sono state molto incoraggianti, e numerosi sono i lavori scientifici, i brevetti ed i prototipi sviluppati dai primi anni 2000, come mostrato in Figura 2. Ad oggi si possono contare più di 100 prototipi realizzati in tutto il mondo, incluso alcuni in Italia [2, 3].

Una panoramica di prototipi RTMR è disponibile in [4], mentre le interessanti prospettive nel settore della criogenia sono illustrate in [5].

Per capire quali sono i parametri prestazionali della refrigerazione magnetica ed i relativi limiti per sostituire la refrigerazione tradizionale a compressione di vapore, si può far riferimento alla Figura 3, dove le due tecnologie vengono messe a confronto.

### SISTEMI REFRIGERANTI A CONFRONTO REFRIGERAZIONE MAGNETICA vs. COMPRESSIONE DI VAPORE

L'effetto refrigerante MCE dei materiali è possibile solo nell'intorno della temperatura di Curie (transizione di fase del secondo ordine) e dipende fortemente dall'ampiezza del campo di temperatura in cui si opera («span») e dall'intensità dei campi magnetici applicati (Tesla).

$$\Delta T_{ad}(T, B_1, B_2) = - \int_{B_1}^{B_2} \frac{T}{c_{p,B}} \cdot \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_{B,p} dB$$

**Gadolinio**  
≈ 2K/T

**R134a**  
≈ 9K/bar

$$\Delta S_T(T, B_1, B_2) = \int_{B_1}^{B_2} \left( \frac{\partial M}{\partial T} \right)_{B,p} dB$$

≈ 0.5kJ/kg/T

≈ 200kJ/kg

≈ Transizione di fase del secondo ordine magnetica

≈ Transizione di fase del primo ordine liquido-vapore

≈ 4MJ/m<sup>3</sup>/T

≈ 2.8MJ/m<sup>3</sup>

$$\delta Q = TdS$$

ΔT=2÷4K

ΔT=10÷50K

«Second law efficiency» (COP/COP<sub>carnot</sub>) 0.4÷0.75

0.1÷0.5

Figura 3. Confronto tra cicli refrigeranti RTMR e compressione di vapore. I gradienti che inducono l'effetto refrigerante sono da un lato il campo magnetico (Tesla), dall'altro la pressione (bar). La principale differenza tra i due sistemi è il salto di temperatura (specifica) tra sorgente calda e fredda, che per l'uno è solo 2°C/Tesla (in assenza di rigenerazione) e per l'altro arriva tranquillamente a 9°C/bar. L'efficienza termodinamica dei sistemi RTMR è tuttavia quasi il doppio di quelli a compressione di vapore

Nonostante queste prestazioni molto interessanti, il salto di qualità dei prototipi esistenti verso la commercializzazione non è ancora avvenuto, principalmente a causa di necessità di ulteriore ricerca sui materiali ad effetto MCE e di ulteriore riduzione dei costi. Il rallentamento dello sviluppo dei sistemi RTMR può anche essere capito osservando con attenzione gli andamenti di Figura 2 e la statistica di Figura 4, che offrono i seguenti spunti di discussione:

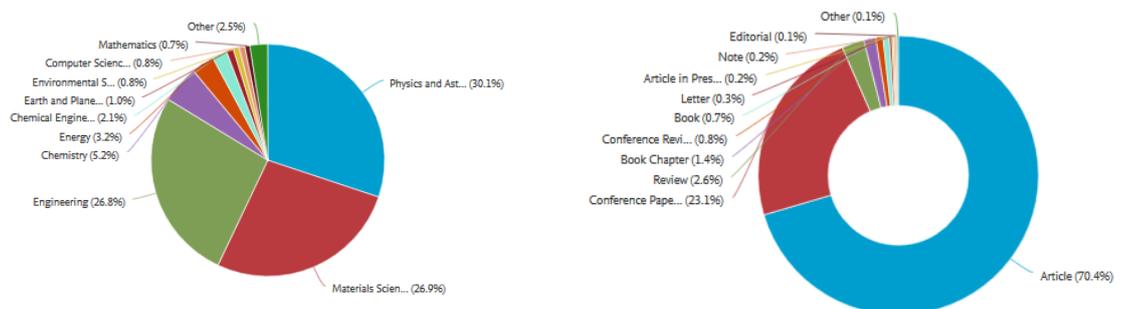


Figura 4. Analisi dei documenti pubblicati per settore scientifico (sinistra) e per sede di pubblicazione (destra)

- a) Il maggior sviluppo dei RTMR si è avuto nei primi anni 2000, dopo la diffusione del gadolinio come materiale MCE e l'ingegnerizzazione dei rigeneratori a letto poroso. Con tali sviluppi è stato possibile ottenere la refrigerazione magnetica a temperatura ambiente con potenze ragionevolmente elevate (qualche kW) e salti di temperatura significativi (20-30°C). Questa crescita di interesse, dimostrata dal notevole incremento di lavori scientifici e brevetti, si è mantenuta fino agli anni 2013-2014.
- b) In tempi recenti sono sorte diverse difficoltà, che hanno smorzato gli entusiasmi iniziali. Questa tendenza è dimostrata da una flessione delle curve di figura 2 e dal fatto che ad oggi la percentuale di lavori nel settore ingegneristico (quello che prelude all'arrivo sul mercato delle nuove tecnologie) è ancora dell'ordine del 25%, mentre la maggior parte degli studi sono ancora dedicati allo sviluppo di nuovi materiali ed alla ricerca fisica di base.

## CONCLUSIONI

La refrigerazione magnetica è una interessante alternativa ai sistemi tradizionali a compressione di vapore, offrendo prestazioni termodinamiche migliori, minor impatto ambientale, riduzione della rumorosità e maggiore affidabilità. La sua applicazione nei sistemi alle basse temperature per criogenia ha una lunga tradizione e può essere considerata una realtà. Per quanto riguarda la sua applicazione ai sistemi refrigeranti nell'intorno della temperatura ambiente (RTMR) per applicazioni di condizionamento dell'aria e simili si può dire che gli sviluppi tecnologici ed ingegneristici necessari alla sua realizzazione sono stati fatti e sono disponibili, ma ci sono ancora alcune difficoltà che ostacolano l'ingresso dei RTMR sul mercato, prevalentemente legati alla necessità di ulteriore ricerca sui materiali MCE ed alla riduzione dei costi di costruzione.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] BingfengYua, MinLiua, Peter W.Egolf, Andrej Kitanovski: 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.
- [2] Tagliafico, L.A., Scarpa, F., Valsuani, F., Tagliafico, G.: Preliminary experimental results from a linear reciprocating magnetic refrigerator prototype; Applied Thermal Engineering (2013) 52(2), pp. 492-497.
- [3] C.Aprea, G.Cardillo, A.Greco, A.Maiorino, C.Masselli: A rotary permanent magnet magnetic refrigerator based on AMR cycle; Applied Thermal Engineering, Volume 101, 25 May 2016, Pages 699-703
- [4] Scarpa, F., Tagliafico, G., Tagliafico, L.A. : A classification methodology applied to existing room temperature magnetic refrigerators up to the year 2014;Renewable and Sustainable Energy Reviews (2015) 50, pp. 497-503
- [5] Zhang, H., Gimaev, R., Kovalev, B., Kamilov, K., Zverev, V., Tishin, A. Review on the materials and devices for magnetic refrigeration in the temperature range of nitrogen and hydrogen liquefaction. Physica B: Condensed Matter, Volume 558, 1 April 2019, Pages 65-73

REFERENCES