

# UN PROTOTIPO SEMPLICE ED EFFICIENTE DI REFRIGERATORE MAGNETICO

*Peter W. Egolf, Fabrice Gendre, Osmann Sari,  
Andrej Kitanovski, Christophe Besson*  
*Università di Scienze Applicate della Svizzera occidentale  
Yverdon-les-Bains (Svizzera)*

## Sommario

I materiali magnetocalorici permettono l'impiego di una nuova tecnologia della refrigerazione, detta refrigerazione magnetica. Straordinari sviluppi nella scienza dei materiali hanno portato al perfezionamento dei materiali magnetocalorici. Come risultato, oggi, il raffreddamento magnetico non può venire impiegato a basse temperature (inferiori a 1 Kelvin), ma solo a temperature ambiente o, recentemente, fino a temperature di 200 °C. In base a ciò, è possibile avere nuove applicazioni nella refrigerazione a temperature ambiente, progettare pompe di calore magnetiche per il riscaldamento degli edifici o persino produrre energia con sorgenti di calore a bassa temperatura. In questo articolo viene illustrato un refrigeratore magnetico molto semplice ed efficiente con scambiatori di calore porosi rotanti. Inoltre vengono brevemente illustrati i risultati delle prime simulazioni numeriche del comportamento magnetico e termodinamico di questo refrigeratore.

## Introduzione

In un precedente articolo, sulla medesima rivista, Egolf et al. [1] hanno brevemente illustrato la storia e la tecnologia della refrigerazione magnetica a temperatura ambiente. Questa tecnologia, in virtù della sua innocuità ambientale, può diventare un'alternativa molto interessante ai tradizionali cicli a compressione di vapore, che sta diventando sempre più svantaggiosa a causa di tutte le restrizioni riguardanti i refrigeranti, specialmente gli HCFC ed i CFC. La refrigerazione magnetica permette di ottenere coefficienti di prestazione molto elevati. Quindi, questa tecnologia può anche rappresentare un'alternativa economica alla refrigerazione convenzionale.

Le ricerche sui materiali magnetocalorici – adatti alla refrigerazione magnetica a temperature prossime a quella ambiente – sono notevolmente aumentate attorno agli anni '80. Il numero di articoli

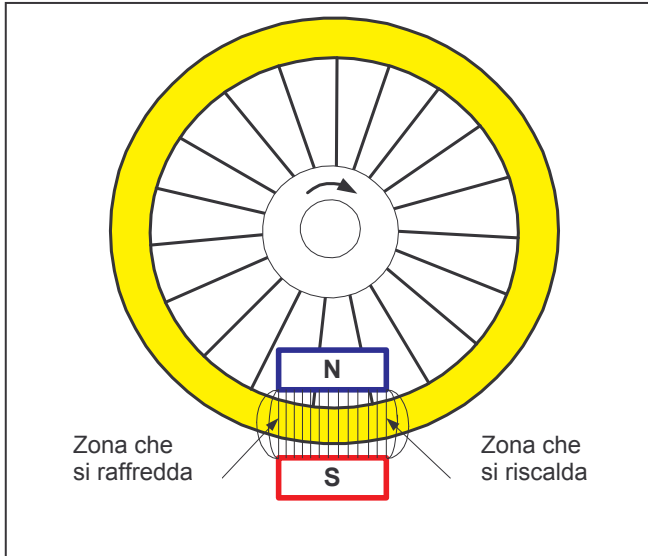
recensiti mostra una crescita esponenziale dopo l'invenzione delle leghe basate sul Gadolinio (Gd), che è stato scoperto presso i laboratori AMES ([1],[2],[3] e [4]). Da allora sono state scoperti numerosi composti magnetocalorici, come ad esempio quelli basati sul Manganese (Mn) ([5],[7]). Una recensione riguardante i vari materiali magnetocalorici si trova in bibliografia ([8], [10]). Lo sviluppo di questi materiali risulta essere tuttora in enorme crescita, fatto che contribuisce a fare della refrigerazione e del riscaldamento magnetico una tecnologia sempre più interessante, anche per applicazioni su larga scala. Tali sviluppi possono condurre a nuove tecnologie con applicazioni pratiche nelle microtecnologie, nei processi industriali, negli impianti HVAC, nei refrigeratori, nelle pompe di calore, nelle automobili, nei treni, aeroplani e nei veicoli spaziali.

## Il principio fisico

Il principio fisico su cui si basa il funzionamento di un refrigeratore magnetico è analogo al principio di funzionamento di un refrigeratore convenzionale (vedi tabella 1). Nel primo passo del processo invece che la compressione del refrigerante si ha una lega magnetocalorica – che rappresenta il refrigerante dell'impianto di refrigerazione magnetico – che viene mossa all'interno di un campo magnetico (il campo magnetico aumenta, passo numero 1). In entrambi i casi il refrigerante si surriscalda e deve essere raffreddato mediante l'estrazione di calore (passo numero 2). In seguito il campo magnetico nella lega magnetocalorica diminuisce di nuovo. Questo processo, passo numero 3, è analogo al processo di espansione in un refrigeratore convenzionale. Normalmente il materiale metallico lascia il campo magnetico, in modo che esso scenda al valore di 0 Tesla dal lato freddo (passo numero 4). Questa diminuzione nel campo magnetico porta ad un effetto frigorifero. In questo frangente il materiale magnetocalorico viene posto a contatto con la sorgente di calore, che si raffredda, dando luogo ad un processo frigorifero. Se questi quattro passi vengono applicati in maniera ripetitiva, si ottiene una macchina frigorifera magnetica ciclica.

**Tabella 1:** *Analogia tra un ciclo a compressione/espansione di gas ed un ciclo frigorifero magnetico*

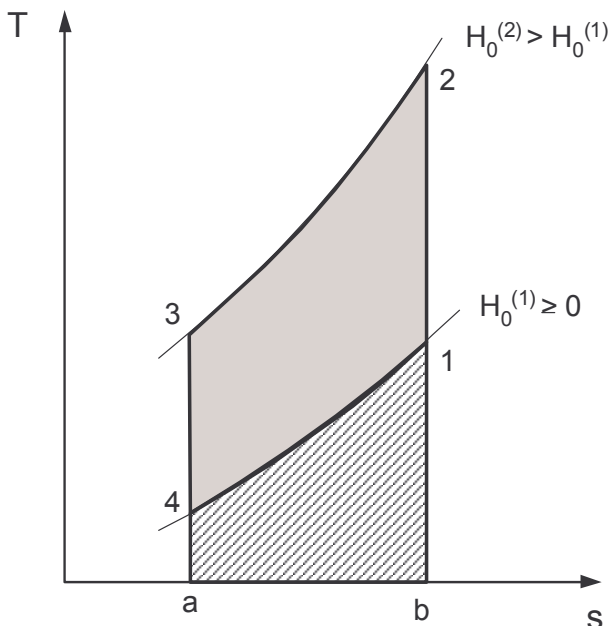
Passo del processo	Processo fisico del sistema convenzionale	Processo fisico del sistema magnetico
1	Compressione	Aumento del campo magnetico
2	Rigetto del calore	Rigetto del calore
3	Espansione	Diminuzione del campo magnetico
4	Acquisto di calore	Acquisto di calore



**Figura 1** – Un refrigeratore magnetico può essere pensato composto da un materiale magnetocalorico che si muove in maniera periodica dentro e fuori un campo magnetico o che ruota attraversando le linee del campo magnetico come mostra la figura. In questo esempio una ruota (rotore) gira in senso orario. Quando la ruota, composta dal materiale magnetocalorico,

transita attraverso i due poli magnetici si riscalda. Invece, quando abbandona la zona magnetica si raffredda.

Poiché il movimento meccanico di un materiale magnetocalorico attraverso un campo magnetico di solito viene equiparato al processo di diffusione del calore, i processi di magnetizzazione e di smagnetizzazione vengono considerati adiabatici. Un ciclo composto da due isomagnetiche (trasformazioni che avvengono con campo magnetico  $H_0$  costante) e due isoentropiche (trasformazioni che avvengono ad entropia specifica  $s$  costante) viene detto ciclo di Brayton (vedi fig. 2).



**Figura 2** – Quando un materiale magnetocalorico si muove all'interno di un campo magnetico (processo 1-2), l'entropia totale rimane costante. Ma a causa della magnetizzazione adiabatica ( $\Delta H_0 = H_0^{(2)} - H_0^{(1)}$ ) la temperatura del materiale magnetocalorico aumenta. A questa temperatura elevata il calore viene rigettato dal materiale (2-3). Nel processo di smagnetizzazione adiabatica (3-4) il materiale magnetocalorico si raffredda. Nell'ultima fase (4-1) il calore viene acquistato dalla sorgente

calda.

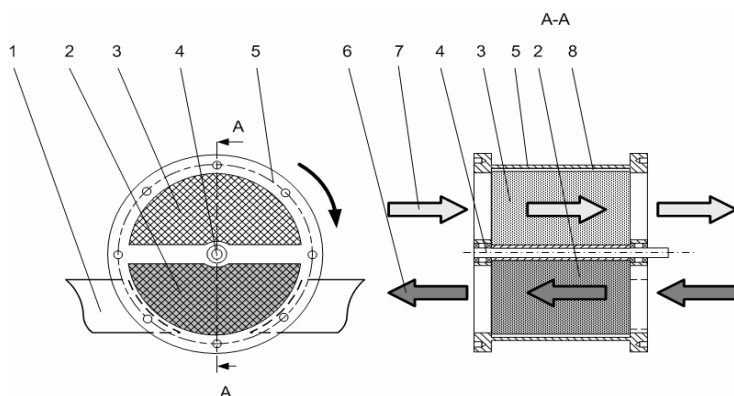
Il ciclo di Brayton è il ciclo più diffuso nel caso della refrigerazione magnetica. Ma esistono anche altri cicli, come ad esempio il ciclo

Ericsson, il ciclo di Carnot, ecc. Poiché le differenze di temperatura ottenibili attraverso il materiale magnetocalorico non sono molte elevate, vengono impiegati cicli in cascata e rigenerativi ([1]).

### Il refrigeratore magnetico svizzero

Nei refrigeratori magnetici il tempo per l'acquisto od il rigetto del calore da parte della lega magnetocalorica risulta essere generalmente breve. Perciò è necessario impiegare elevate superfici di scambio termico e ridurre la diffusione penetrativa. Queste esigenze vengono pienamente soddisfatte da strati compatti o strutture porose (vedi figura 3). Tali dispositivi consentono di avere ampie superfici volumetriche di scambio del calore tra il fluido di lavoro e la struttura metallica. Il fattore ottimale di riempimento è funzione della potenza del refrigeratore, delle condizioni operative, delle proprietà del fluido e deve essere determinato per mezzo di procedure di ottimizzazione associate a modelli termodinamici.

In uno dei nostri refrigeratori, con brevetto registrato [12], questo viene ottenuto mediante la rotazione di uno scambiatore di calore poroso a forma cilindrica dalla metà di un campo magnetico all'altra metà del campo magnetico. Il trasferimento di calore al refrigerante metallico si realizza mediante i fluidi di lavoro, solitamente acqua o aria. I campi magnetici vengono generati dai magneti, che preferibilmente devono essere di tipo permanente. Per far girare la ruota magnetocalorica è necessario vincere una forza. Il lavoro compiuto risulta analogo a quello necessario a far funzionare un compressore in un sistema convenzionale.



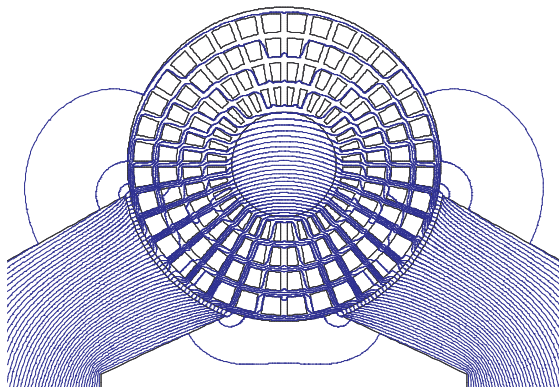
**Figura 3** – Il semplice principio di funzionamento relativo ad refrigeratore magnetico viene impiegato in un refrigeratore a ruota di tipo poroso.

- 1 magnete
- 2 ruota (parte calda)
- 3 ruota (parte fredda)
- 4 asse di rotazione
- 5 carcassa con flange
- 6 fluido di lavoro riscaldato
- 7 fluido di lavoro raffreddato
- 8 spazio tra carcassa e ruota

Il magnete è collocato nel semispazio inferiore che circonda la ruota porosa. In questo modo la ruota gira di 180° all'interno del campo magnetico. Dopo di ciò esce dalla metà superiore, dove il campo magnetico è nullo ed avviene il raffreddamento. Quindi il fluido sulla sommità (che fluisce da sinistra a destra) viene raffreddato. D'altra parte il fluido che scorre attraverso la metà inferiore viene riscaldato. Se il flusso superiore, che viene raffreddato, viene inviato, ad esempio, ad una vetrina per supermercati, si ottiene una macchina frigorifera. D'altra parte se il fluido della parte inferiore, che viene riscaldato, viene inviato ad un sistema di riscaldamento, si ottiene una pompa di calore (per uno studio di fattibilità vedi [13]).

### Studio delle prestazioni del sistema

L'efficienza del sistema è generalmente collegata all'intensità del campo magnetico. A temperatura ambiente un magnete permanente capace di generare un campo magnetico molto intenso permette di evitare grosse perdite nel rame.



**Figura 4** – Sono stati condotti studi preliminari sul comportamento magnetico e termodinamico. In questa figura è possibile notare le linee del flusso magnetico (linee a flusso costante) in una ruota a Gadolinio puro alla temperatura di Curie. Queste linee sono state calcolate con una simulazione agli elementi finiti eseguita con un computer. I magneti sono stati ottimizzati al fine di ottenere un campo magnetico molto intenso nel semispazio inferiore del cilindro ed un campo nullo nel semispazio superiore.

Oltre a ciò è stato calcolato il campo di temperature in funzione delle posizioni assiali e azimutali. I coefficienti di prestazione COP ottenuti sono stati molto buoni e si trovano pubblicati in [14]. Da un punto di vista termodinamico non vi è dipendenza radiale. Esperimenti preliminari, condotti senza alcuna ottimizzazione del refrigeratore magnetico, utilizzando una ruota magnetocalorica costituita da  $Gd_5(Si_{1,985}Ge_{1,985}Ga_{0,03})$ , hanno fornito COP di 5,8 [14]. Si prevede di ottenere valori più elevati per mezzo di procedure di ottimizzazione dei

numerosi parametri quali il fattore di compattezza, la velocità di rotazione della ruota, le velocità dei fluidi, le proprietà magnetiche, ecc.

## Conclusioni e prospettive

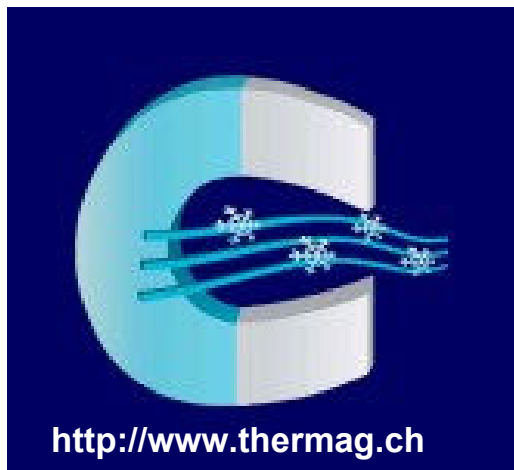
In questa memoria è stato presentato un semplice refrigeratore magnetico, con uno scambiatore di calore poroso a forma di ruota, che risulta essere ancora allo stadio di studio scientifico e di prototipazione.

Le prime simulazioni numeriche mostrano che la distribuzione delle linee del campo magnetico, attraverso il loro addensamento, indicano un'elevata intensità del campo nella struttura metallica. I primi calcoli termodinamici mostrano elevati valori del COP.

In futuro, per ottenere risultati più affidabili, verranno calcolati gli effetti dell'accoppiamento magnetico e termodinamico. Il ricorso a campi magnetici di intensità diversa in corrispondenza di diverse distanze dall'asse (vedi figura 4) conduce ad una dipendenza radiale addizionale e, di conseguenza, un comportamento tridimensionale più complesso.

In Svizzera, nell'autunno 2005, si terrà una Conferenza Internazionale sulla refrigerazione magnetica a temperatura ambiente. Durante i 3 giorni della Conferenza 50 scienziati ed esperti industriali presenteranno i loro lavori in 2 sessioni parallele. Le presentazioni parallele sono divise in:

- materiali e magneti
- sistemi magneto-termodinamici (refrigeratori, e pompe di calore)



**Figura 5** – La prima Conferenza Internazionale sulla refrigerazione magnetica a temperatura ambiente è organizzata da alcuni autori di questo articolo. Essa si terrà dal 27 al 30 settembre 2005 a Montreaux (Svizzera). Alla Conferenza sono attesi centinaia di partecipanti (principalmente del settore della refrigerazione) in modo che si possano comprendere lo stato attuale dell'arte ed i più recenti sviluppi nel campo della refrigerazione magnetica. L'indirizzo del sito web e la registrazione on-line sono riportati sopra.

## Ringraziamenti

Siamo grati alla fondazione Gebert Rűf (Piero Martioli e Philipp Egger) e all'Ufficio Federale Svizzero dell'Energia (Thomas Kopp e Fabrice Rognon) per il supporto finanziario al nostro lavoro scientifico. Ringraziamo Fatih ̖zkadi (Arçelik SA, Turchia) per il suo interesse verso il nostro lavoro.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] P. W. Egolf, A. Kitanovski, Ch. Besson. *La refrigerazione magnetica*. Industria & Formazione per il tecnico della refrigerazione e climatizzazione 7, 22-24, 2004.
- [2] V. K. Pecharsky, and K. A. Gschneidner Jr. "Tunable magnetic regenerator alloys with a giant magnetocaloric effect for magnetic refrigeration from ~ 20 to ~ 290 K," *Applied Physics Letters*, vol. 70 (24), pp. 3299-3301, 1997.
- [3] V. K. Pecharsky, and K. A. Gschneidner Jr. "Effect of alloying on the giant magnetocaloric effect of  $Gd_5(Si_2Ge_2)$ ," *J. Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 167, pp.179-184, 1997.
- [4] K. A. Gschneidner Jr., and V. K. Pecharsky. "Active magnetic refrigerants based on Gd-Si-Ge material and refrigeration apparatus and process," US Patent 5.743.095 (filed in Nov. 1996), 1998.
- [5] O. Tegus, *Novel Materials for Magnetic Refrigeration*. Ph D thesis Van der Waals-Zeeman Institute, Printer Partners. Ipskamp B.V., Enschede, 2003.
- [6] O. Tegus, E. Brűck, K. H. Buschow Jr, F. R. de Boer. "Transition-metal-based magnetic refrigerants for room-temperature applications," *Nature (Letter)*, vol. 415, pp. 150-152, 2002.
- [7] E. Brűck, O. Tegus, X.W. Li, F.R. de Boer, K. H. J. Buschow. "Magnetic refrigeration towards room-temperature applications." *Physica B*, vol. 327, pp. 431 –437, 2003.
- [8] H. Wada, S. Hirosawa. "Magnetic refrigerant material, regenerator and magnetic refrigerator," PCT Patent WO 03/009314 A1, (filed in July 2001), 2003.
- [9] H. Wada, Y. Tamabe. "Giant magnetocaloric effect of  $MnAs_{1-x}Sb_x$ ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79 (20), pp. 3302-3304, 2001.
- [10] K. A. Gschneidner Jr, V. K. Pecharsky. *Magnetic Refrigeration: Intermetallic Compounds Principles and Practice*. vol. 3, Progress, John Wiley & Sons Ltd., 2002.
- [11] A. Kitanovski, P.W. Egolf, *Thermodynamics of Magnetic Refrigeration*, International

Journal of Refrigeration (submitted).

- [12] A. Kitanovski, P. W. Egolf, O. Sari, Procédé et dispositif pour générer en continue du froid et de la chaleur par effet magnetique, Swiss patent BR – 10'463 – CH, Number of deposition: 2002 2212/02, 2002.
- [13] P.W. Egolf, A. Kitanovski, O. Sari, *Machbarkeitsstudie für magnetische Wärmepumpen: Anwendungen in der Schweiz*. Jahresbericht des Energieforschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte, 15. Dezember 2004.
- [14] P.W. Egolf, A. Kitanovski, O. Sari, Ch. Besson, *Magnetic Refrigerator with porous heat exchangers*, International Conference on Magnetism, INTERMAG, Nagoya, Japan, 4<sup>th</sup> – 8<sup>th</sup> of April 2005.