



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



SFIDE ED OPPORTUNITÀ LEGATE ALL'INTRODUZIONE NEL MERCATO DELLA TECNOLOGIA DELLA REFRIGERAZIONE MAGNETICA

**A. PASTORE
CAMBRIDGE LTD**

SFIDE ED OPPORTUNITÀ LEGATE ALL'INTRODUZIONE NEL MERCATO DELLA TECNOLOGIA DELLA REFRIGERAZIONE MAGNETICA

Alessandro Pastore, Neil Wilson
Cambridge Ltd.

Introduzione

Il mercato mondiale della refrigerazione e dell'industria del freddo è di fatto molto grande: l'Istituto Internazionale della Refrigerazione (IIR) nel 2015 ha stimato che i circa 3 miliardi di apparati per la refrigerazione, l'aria condizionata e le pompe di calore attivi nel mondo, consumano il 17% dell'elettricità totale prodotta e che l'industria legata alla refrigerazione genera ricavi per 300 miliardi di USD\$ all'anno dando lavoro a circa 12 milioni di persone¹. Questa industria è essenziale per garantire la sicurezza e l'alta qualità del cibo per miliardi di persone, permette di far funzionare la rete internet e assicura il massimo confort in casa, negli uffici e in auto. Inoltre molti processi medici, chimici e industriali usano la refrigerazione. In poche parole è a tutti gli effetti una delle tecnologie fondative del mondo moderno.

Lo scopo di questo articolo è quello di, brevemente, riassumere le sfide che gli sviluppatori della refrigerazione magnetica devono affrontare nel momento in cui decidono di portare sul mercato le loro soluzioni, così come i fattori abilitanti che renderanno possibile da parte del mercato stesso l'adozione di questa nuova tecnologia.

Uno studio OECD² definisce "innovazione radicale" come "il risultato di un processo complesso piuttosto che di un evento singolo. Le innovazioni radicali sono spesso sviluppate da piccole società o nuovi entranti nel mercato e generalmente sono associate a un processo lungo, difficile e pieno di rischi. La loro massiccia adozione e diffusione quasi sempre dipende, invece, da miglioramenti incrementali, da modifiche e aggiustamenti, dallo sviluppo di tecnologie complementari, da cambi organizzativi e dalla consapevolezza della loro esistenza a livello sociale". In questo senso la refrigerazione magnetica può essere definita una nuova tecnologia radicale. Recenti risultati della ricerca economica sulle organizzazioni mostrano come il mercato accetti l'introduzione e la diffusione di nuove tecnologie radicali attraverso il supporto da parte di diverse "audience" sociali che sono definite come "agenti con un interesse in un dato dominio e con il controllo di risorse materiali e simboliche che ne determinano il loro successo o fallimento nel dominio di riferimento"³. La nozione di audience sociale è stretta parente del concetto dei gruppi sociali sviluppata dai professori Pinch e Bijker⁴, ossia gruppi chiave che danno forma all'adozione di nuove tecnologie, idee o artefatti in un dato mercato di riferimento. Il comportamento delle audience sociali ha un'influenza enorme per il successo di mercato di una nuova tecnologia radicale, in particolare quanto quest'ultima ha come effetto di rimpiazzare una già esistente⁵. Per quanto riguarda la tecnologia della refrigerazione magnetica si possono individuare le seguenti audience:

¹ IIR 29th Informatory Note on Refrigeration Technologies 02/12/2015. Also available from http://www.iifir.org/userfiles/file/publications/notes/NoteTech_29_EN_kf8kw7bg.pdf (last access 07/12/2016.)

² OECD Science, Technology and Industry Outlook 2012. Available at http://www.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/oecd-science-technology-and-industry-outlook-2012_sti_outlook-2012-en (last access on Nov. 21st 2016.)

³ Hsu, G., M. Hannan, Identities, Genres, and Organizational Forms, *Organization Science* 16(5), pp. 474-490, 2005.

⁴ Pinch, T. J., Bijker, W. E., *The Social Construction of Facts and Artefacts: Or How the Sociology of Science and the Sociology of Technology Might Benefit Each Other*. In Bijker, W. E., Hughes, T. P., Pinch, T. J. (Eds.), *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology* (pp. 17 – 50). Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1989.

⁵ Cattani, G., Ferriani, S., Lanza, A., *Navigating the Sea of Controversy: The Legitimation Journey of John Harrison's Marine Chronometer*, Working Paper of the Stern School of Business, New York University, 2012.

- I regolatori del mercato come i governi o simili.
- Gli utilizzatori finali intesi sia come consumatori privati sia come aziende.
- L'industria e il mondo finanziario che presentano sia interessi diretti nella tecnologia che sarà rimpiazzata da quella nuova –in questo caso produttori di gas refrigerante o di compressori- sia presentano solo delle sinergie con la stessa, come potrebbe essere il caso dei produttori di motori elettrici.
- Altri gruppi sociali che influenzano direttamente l'elaborazione di policy a livello governativo e commerciale oppure l'opinione pubblica come gruppi di lobby, NGOs e media.

Il ruolo dei governi

Un numero sempre più grande di governi ha approvato misure legislative volte ad incoraggiare l'adozione di tecnologie più efficienti e amiche dell'ambiente, sia attraverso il divieto di vendere prodotti che presentano livelli di consumo energetico troppo elevato sia imponendo ai produttori di informare i loro clienti del livello di efficienza raggiunto dalle loro soluzioni. Un altro aspetto importante è quello del sostegno alle attività di Ricerca e Sviluppo in tutti i campi che potranno aiutare il raggiungimento degli obiettivi delle loro policy⁶. Per esempio in Europa ci sono vari programmi nazionali così come il programma quadro per la ricerca e lo sviluppo della Commissione Europea; negli Stati Uniti il Department of Energy offre numerose opportunità di finanziamento alla ricerca; in Giappone esistono opportunità di finanziamento offerte da NEDO (New Energy and Industrial Development Technology Organisation). Tutte questi enti hanno sostenuto negli ultimi dieci anni programmi di ricerca nel campo della refrigerazione magnetica a temperatura ambiente. È utile ricordare come proprio il Department of Energy abbia definito in un suo studio del 2010 la tecnologia della refrigerazione magnetica come la sola che nel medio periodo possiede il potenziale di rimpiazzare la tecnologia dei compressori⁷.

Il ruolo degli utilizzatori finali

La seconda audience è composta dagli utilizzatori finali intesi sia come consumatori privati sia come aziende. Molti studi di microeconomia hanno analizzato i fattori abilitanti e le barriere all'acquisto e all'adozione di apparati efficienti da parte dei clienti⁸. In certe regioni come l'Europa Occidentale, i consumatori mostrano una spiccata propensione a pagare un prezzo maggiore pur di poter acquistare degli elettrodomestici più efficienti. Per esempio osservando i dati di mercato di 10 paesi europei dal 2000 al 2013 si può chiaramente individuare una dinamica che vede i frigoriferi di classe più efficiente individuabili dall'aggiunta del segno + dopo la A, diventare i prodotti più venduti sul mercato dopo 7-8 anni a dispetto del fatto nel momento della loro introduzione avessero di gran lunga un prezzo di acquisto più alto di quelli meno efficienti. Clienti business come le catene di fast food e di supermercati hanno iniziato a considerare nei loro acquisti sempre più soluzioni di raffreddamento più amiche dell'ambiente al fine di aumentare le loro credenziali ambientali. Di fatto questa tendenza continuerà se il ritorno su investimento (che in generale comprende i costi di manutenzione lungo tutto il periodo di vita del prodotto e il livello di supporto che la tecnologia richiede) presenta dei valori positivi.

⁶ Correa, P., Andrés, L., and Borja-Vega, C., The Impact of Government Support on Firm R&D Investments - A Meta-Analysis, The World Bank Entrepreneurship and Innovation Unit, South Asia Sustainable Development Department Water and Sanitation Program, July 2013.

⁷ DOE: National Lab. report: PNNL-19259, page 5

⁸ Ryan, L., Moarif, S., Levina, E., Baron, R., Energy Efficiency Policy, And Carbon Pricing, Information Paper, IEA, August 2011. Available at https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EE_Carbon_Pricing.pdf (last access on Nov. 21st 2016.)

Il ruolo dell'industria

L'industria della refrigerazione che usa la tecnologia dei compressori è un'industria storicamente ben definita che comprende nella sua catena industriale i produttori di gas refrigerante, di compressori a gas e delle applicazioni finali della refrigerazione. L'uso dei gas è la più grande sfida ambientale che questa industria ha dovuto, deve e dovrà affrontare. Fino ad oggi i produttori di gas e dei compressori hanno avuto le competenze per risolvere il problema di trovare nuovi gas più rispettosi dell'ambiente e disegnare nuovi compressori che si adattassero a questi gas e che rispondessero ai nuovi regolamenti e alla domanda di mercato per apparati più efficienti.

Questo processo di sviluppo incrementale non segue un percorso facile e, per questo, esiste l'incentivo a sviluppare tecnologie completamente diverse com'è quella refrigerazione magnetica. Quest'ultima presenta i seguenti vantaggi per l'ambiente e i clienti finali:

- L'efficienza di un'applicazione che usa una pompa di calore che si basa sui principi della refrigerazione magnetica è, in principio, superiore a quella delle stesse applicazioni che usano i compressori a gas grazie al fatto che il motore magnetico può essere progettato per funzionare tra una temperatura di esercizio calda ed una fredda molto vicino alle temperature di esercizio dell'applicazione stessa.
- Non necessita dell'uso di alcun gas e lubrificante.
- Minore rumore di esercizio.
- Facilità nella fase di smaltimento a fine vita. In particolare l'assenza di gas non richiede le pesanti procedure di gestione dei gas.

I vantaggi sopra citati dovranno, però, essere accompagnati da un costo di produzione che ne garantisca nel lungo termine il successo in un mercato di massa. I recenti risultati raggiunti da Camfridge Ltd. che è leader nello sviluppo della tecnologia della refrigerazione magnetica per quanto riguarda il peso le dimensioni delle macchine, hanno permesso di provare già a livello prototipale i vantaggi in termini di costo e di benefici per l'ambiente⁹.

Quadro di riferimento per l'analisi economica di una pompa di calore che si basa sui principi della refrigerazione magnetica

Dal punto di vista concettuale una pompa di calore magnetocalorica è composta da 5 elementi:

- Un magnete permanente che fornisce in un dato volume un campo magnetico sufficiente ad attivare in maniera efficiente le proprietà dei materiali magnetocalorici.
- Il rigeneratore che contiene al suo interno la struttura porosa di materiale magnetocalorico.
- Il motore elettrico che muove i rigeneratori dentro e fuori dal campo magnetico generato dal magnete permanente.
- Le pompe che pompano il fluido attraverso i rigeneratori e gli scambiatori di calore.
- Il sistema di gestione del fluido.

Una possibile equazione che permette di valutare le performance di sistemi magnetocalorici diversi ma che usano lo stesso materiale magnetocalorico è la seguente:

⁹ R. Luglietti, P. Rosa, A. Pastore, S. Terzi, M. Taisch, "Life Cycle Assessment Tool Implemented in Household Refrigeration Industry: A Magnetic Cooling Prototype Development", 14th Global Conference on Sustainable Manufacturing, GCSM 3-5 October 2016, Stellenbosch, South Africa.

Frequenza di esercizio x (campo magnetico massimo – campo magnetico minimo) x volume

Dove la frequenza può essere dell'ordine di 0.5Hz per sistemi lineari oppure dell'ordine di 2Hz-4Hz per sistemi rotativi. La variabile "volume" permette di considerare la forza di picco sentita dal motore elettrico e legata al disegno, alla geometria e all'esatta posizione del rigeneratore con la forma del magnete stesso. A questo riguardo, il rapporto tra il valore di campo magnetico massimo e la superficie aperta del magnete si modifica quando cambiano le dimensioni del magnete. In generale, più grandi sono queste ultime e migliore è questo rapporto, anche se esistono dei limiti fisici che si devono considerare. Sulla base dell'equazione sopra riportata e di queste prime considerazioni al fine di paragonare pompe di calore magnetocaloriche diverse, si possono utilizzare le seguenti metriche qualitative:

1. La dimensione e il peso della pompa di calore magnetocalorica rispetto a quelli del compressore a gas che si vuole sostituire.
2. Il costo di assemblaggio del magnete permanente.

La pompa di calore magnetocalorica deve inoltre rispondere alle specifiche dell'applicazione finale in termini di temperature di esercizio e livello di efficienza. È importante sottolineare che le specifiche della pompa di calore magnetocalorica devono essere sempre riferite a quelle richieste e definite dall'applicazione finale e non a quelle del compressore. Qualche volta a causa del "pensiero per compartimenti stagni" indotto da decenni di predominanza della tecnologia a compressione si tende a richiedere e comparare le prestazioni della pompa di calore con quelle del ciclo ASHRAE del compressore e non con quelle dell'applicazione per cui è stata progettata, dimenticandosi così che lo scopo finale è la produzione di applicazioni di refrigerazione ad alta efficienza e basso costo, e non quello di replicare meramente le prestazioni del compressore a gas.

Un compressore a gas presenta una curva di tipo parabolico quando le variabili di costo/volume e peso sono messe in relazione con la potenza mentre se si stimano le medesime curve sulla base dei dati dei prototipi di pompe di calore magnetocaloriche note, si osserva una curva di tipo lineare o quasi lineare. Sovrapponendo le due curve si può individuare il range di potenze delle applicazioni finali per cui la pompa magnetocalorica è più competitiva rispetto all'uso dei compressori a gas. Si può osservare che in base agli accordi internazionali come quello di Kigali nel 2016 il costo delle applicazioni che usano i compressori a gas potrebbe aumentare allargando la zona di competitività economica della refrigerazione magnetica. In ogni caso allo stato attuale delle conoscenze sulle prestazioni e costi previsionali si può affermare che, quando la potenza frigorifera è minore di 1 kW, non ci sono ragioni strutturali perché il costo totale derivante dalla somma dei costi in conto capitale e operativi di un'applicazione che usa una pompa di calore magnetocalorica sia più elevato della sua equivalente che usa un compressore a gas.

Come il mercato della refrigerazione domestica può rappresentare un'opportunità per la tecnologia della refrigerazione magnetica

Il valore del coefficiente di prestazione dei compressori a gas per i frigoriferi domestici sono decrescenti quanto più diminuisce la potenza frigorifera erogata. Questo dato si può spiegare con il fatto che il valore assoluto delle perdite da attrito meccanico, essenzialmente dovute alla presenza di un lubrificante all'interno del compressore, è proporzionalmente piccolo quando la potenza refrigerante è nell'ordine di alcune centinaia di W ma diventa molto importante nel caso della potenza frigorifera richiesta dai frigoriferi domestici, ossia

qualche decina di W¹⁰. La pompa di calore magnetocalorica non ha nessun lubrificante e per questo motivo è ragionevole aspettarsi che per potenze frigorifere inferiori a 100W, la tecnologia della refrigerazione magnetica sia intrinsecamente superiore a quella dei compressori a gas con lubrificante. Inoltre, la pompa di calore magnetocalorica può essere progettata per lavorare in maniera affidabile e robusta a temperature di esercizio molto vicine a quelle del frigorifero, permettendo così di raggiungere una efficienza termodinamica superiore dell'elettrodomestico. Proprio grazie a questo fatto un cabinet connesso ad una pompa magnetocalorica può ridurre della metà i consumi.

I costi di smaltimento di un frigorifero sebbene non siano ancora totalmente a carico dell'utilizzatore finale, sono comunque un costo che pesa sull'industria. Prima di ogni operazione di smaltimento, il gas contenuto all'interno del compressore deve essere trattato seguendo delle specifiche procedure. Grazie al fatto che le pompe di calore magnetocaloriche non usano gas, le procedure di smaltimento saranno semplificate riducendo in questo modo i costi.

Studi molto recenti ^{9,11} hanno confrontato il dettaglio dei costi lungo tutto il ciclo di vita di un frigorifero ad alta efficienza che usava un compressore a gas con quello che usava un prototipo di pompa di calore magnetocalorica, arrivando alla conclusione che i costi ambientali sono dello stesso ordine di grandezza e potrebbero essere notevolmente migliorati se il magnete permanente usasse materiale riciclato e non vergine come nel caso in studio.

Il completamento dei test su prototipi di frigorifero che usano pompe di calore magnetocaloriche, come ad esempio quelli del progetto di ricerca europea ELICiT¹², ha reso possibile l'inizio di un nuovo cammino di questa nascente industria verso "la massiccia adozione e diffusione" della tecnologia che, come ricordato all'inizio dell'articolo, "dipende da miglioramenti incrementali, da modifiche e aggiustamenti, dallo sviluppo di tecnologie complementari, da cambi organizzativi e dalla consapevolezza della loro esistenza a livello sociale".

Ringraziamenti

I risultati presentati in questo lavoro sono stati resi possibili dai finanziamenti del settimo programma quadro di ricerca dell'Unione Europea (FP7/2007-2013): grant ENV-2013-603885¹²; grant n° 245288¹³; grant NMP3-SL-2008-214864¹⁴ e grant NMP3-SL-2012-310748¹⁵. Parte del contenuto di questo articolo sarà presente nel libro di prossima uscita "Magnetic cooling: from fundamentals to high efficiency refrigeration", Edited by: K.G

¹⁰ D. Beers, M. Benedict, M. Schroeder, O. Abdelaziz, Practical Refrigerated Appliance Design and the problems Posed to Magnetocaloric Machines, Delft Days Magnetocaloric DDMC Science Center, TU Delft, November 2015.

¹¹ Bjørk, R., Bahl, C. R. H., Nielsen, K. K., The lifetime cost of a magnetic refrigerator, International Journal of Refrigeration - Revue Internationale du Froid, vol. 63, 48-62 p., March 2016.

¹² See: <http://elicit-project.eu/>

¹³ See: <http://www.frisbee-project.eu/>

¹⁴ See: <http://www.sseec.eu/>

¹⁵ See: <http://www.drream.eu/>

