

## OTIMIZAÇÃO DE REGENERADORES PARA OPERAÇÃO EM REFRIGERAÇÃO MAGNETOCALÓRICA

### Rafael P. Teixeira

POLO - Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC  
Trindade – Caixa Postal 476 – Florianópolis (SC) – 88040-900  
rafaelptx@polo.ufsc.br

### Juliano W. F. Heidrich

POLO - Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC  
Trindade – Caixa Postal 476 – Florianópolis (SC) – 88040-900  
juliano@polo.ufsc.br

### Alvaro T. Prata

POLO - Laboratórios de Pesquisa em Refrigeração e Termofísica  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC  
Trindade – Caixa Postal 476 – Florianópolis (SC) – 88040-900  
prata@polo.ufsc.br

**Resumo.** Este trabalho tem como objetivo otimizar alguns parâmetros afetos ao regenerador de uma máquina de refrigeração que opera fazendo uso do efeito magnetocalórico. O efeito magnetocalórico é uma tecnologia pouco explorada na área de refrigeração em temperaturas próximas da ambiente, mas que tem se apresentado como promissora em virtude de novos avanços associados ao desenvolvimento de novos materiais. Alguns metais quando submetidos a um campo magnético têm a sua temperatura elevada e quando o campo é retirado a temperatura é reduzida, caracterizando o que se entende por efeito magnetocalórico. Neste artigo serão discutidas generalidades sobre materiais magnetocalórico e em seguida é proposta uma máquina para a utilização desta tecnologia. O refrigerador proposto é constituído de uma bomba que imprime um movimento periódico oscilatório ao fluido de trabalho, conduzindo-o através de dois trocadores de calor e de um regenerador. Dependendo do sentido do escoamento do fluido de trabalho este absorve ou cede calor para o ambiente. O regenerador é formado por placas planas paralelas e é constituído de gadolínio que é o material magnetocalórico utilizado no presente trabalho. Fazendo uso de algoritmos genéticos, a amplitude e a frequência da vazão mássica do fluido de trabalho serão otimizadas de forma a propiciar a maior capacidade de refrigeração. Os resultados apresentam valores para os pontos ótimos de amplitude e frequência do fluxo de massa para diferentes temperaturas da fonte quente e da fonte fria.

*Palavras chave:* Magnetocalórico, Refrigeração, Otimização, Simulação.

### 1. Introdução

Efeito magnetocalórico é a propriedade de alguns materiais de gerar calor quando são submetidos a um campo magnético externo. O efeito é devido ao acoplamento da rede interna de partículas magnetizadas com um campo magnético, o que muda a parcela magnética da entropia do sólido. Tal como a compressão de um gás, a magnetização isotérmica de um material paramagnético ou ferromagnético leve, reduz a entropia e, em um processo reversível, a desmagnetização (similar à expansão de um gás) restaura a entropia magnética do material. Esta redução de entropia ocorre pela liberação de calor pelo material

Após a aplicação do campo magnético externo a temperatura do material sofre um acréscimo. Este acréscimo depende do tipo de material utilizado, da intensidade do campo magnético e da temperatura em que se encontra o material. O acréscimo de temperatura em função da temperatura do material possui um ponto de ótimo. A temperatura deste ponto é chamada de temperatura de Curie.

Este comportamento físico de alguns materiais é conhecido há mais de um século e a sua aplicação para refrigeração foi demonstrada experimentalmente pela primeira vez em 1933 por W. F. Giauque e D. P. MacDougall, o primeiro ganhador do prêmio Nobel de química de 1949. Diversas configurações de sistemas de refrigeração magnetocalórico têm sido propostas, porém nenhuma foi utilizada em larga escala para aplicação comercial. Há várias

dificuldades associadas à implementação tecnológica da refrigeração magnetocalórica cuja essência está no desenvolvimento de materiais adequados. Para aplicações em temperaturas próximas da ambiente, o uso de regeneradores de calor tem se mostrado uma alternativa muito promissora, conforme explorado por Heidrich e Prata (2006). No presente trabalho, o circuito de refrigeração explorado por Heidrich e Prata será utilizado e a amplitude média e a vazão mássica do fluido refrigerante serão otimizadas para o melhor desempenho do refrigerador.

## 2. Materiais Magnetocalóricos

Recentemente, diversas pesquisas têm sido realizadas sobre os elementos magnéticos puros e suas ligas de solução sólida com vistas ao desenvolvimento de novos materiais. Para uma revisão sobre o estado da arte de materiais e o efeito magnetocalórico, referência é feita aos trabalhos de Gschneidner e Pecharsky (2000), Gschneidner e Pecharsky (2002) e Tishin e Spichkin (2003). Algumas da descobertas mais recentes serão exploradas a seguir.

Chernyshov *et al.* (2002) estudaram o MCE do metal terra rara disprósio, Dy, de cristal único e elevada pureza quando o campo magnético foi aplicado no sentido fácil da magnetização nos campos de até 14 kOe. No geral, seus resultados apresentaram boa concordância com os resultados prévios do Dy policristalino de baixa pureza. Entretanto, os autores descobriram duas novas fases de campo magnético alto nas regiões de temperatura de 105 a 127 K e de 179 a 182 K, e um novo diagrama de fase magnética foi proposto. Um MCE positivo razoavelmente substancial (isto é  $\Delta T_{ad} > 0$ ) é observado em temperaturas próximas de 90 K na transição de primeira ordem do antiferromagnético para ferromagnético, que cresce mais rapidamente e é aproximadamente 10-30% maior do que o previamente observado. Entre 160 e 180 K há um  $\Delta T_{ad}$  negativo pequeno que é mais ou menos como o observado previamente. Entretanto, entre 180 e 210 K há outra vez um MCE positivo que é, sobre um fator de 2, maior do que o previamente observado no Dy policristalino de baixa pureza.

O efeito de dopar 50-50 o Gd:Dy ligado com Nd (até 30%) foi estudado por Dai *et al.* (2000), que encontrou a temperatura de Curie abaixo de 235 K para a liga base a 165 K para  $Gd_{0,35}Dy_{0,35}Nd_{0,30}$ . A variação de entropia magnética,  $\Delta S_M$ , foi reduzida em 15% na respectiva temperatura requisitada pela substituição do Nd para Gd: Dy. Sob armazenamento em ar por dois anos, a magnetização do Nd contendo ligas diminuiu em aproximadamente 20%, enquanto aquelas sem Nd não mudaram. Isto deverá ter um efeito notável nas propriedades do MCE das ligas substitutas do Nd. As adições de Tb e de Nd ao Gd abaxam a temperatura de Curie do Gd e que as adições pequenas de Nd (~5%) têm somente uma ligeira influência no MCE da liga de  $Gd_{1-x}Tb_x$ .

Wang *et al.* (2004) observaram que as adições de B ao Gd (2, 5 e 7%) expandiram o volume da célula unitária, elevando a  $T_C$  de 4 a 298 K, aumentando a capacidade de refrigeração em 12% e não tendo nenhum efeito na  $\Delta S_M$ . A variação dos parâmetros da rede e da  $T_C$  com B sugeriu que a máxima solubilidade sólida do B no Gd é 2% ou menos.

A dependência de temperatura do MCE do Er é completamente complexa, desde que tenha uma transição magnética de primeira ordem em 18,7 K, duas transições de segunda ordem em 52,7 e 86,4 K e a transição rotação-deslizamento em 26,2 K. A adição de Pr no Er ( $Er_{1-x}Pr_x$  para  $0 \leq x \leq 0.30$ ) foi estudada por Wu *et al.* (2002). Eles verificaram que a temperatura requerida de 86,4 K estava abaixo e que a de 18,7 K do pico de primeira ordem estava acima por adições de Pr. Em conseqüência, o  $\Delta T_{ad}$  em 18,7 K em Er puro é reduzido em aproximadamente um terço para  $x \geq 0.1$  para uma mudança do campo magnético de 0 a 20 kOe, quando o MCE da transição superior (86,4 K) aumentar por um fator de 2. Isto resulta em um MCE quase constante entre 35 e 50 K para  $0.1 \leq x \leq 0.3$ . Para uma mudança do campo de 0 a 50 kOe, o MCE associado com a transformação 18,7 K é reduzido também para  $0.1 \leq x \leq 0.2$ , mas para  $x = 0.2$  a temperatura superior requisitada foi reduzida a aproximadamente 50K e seu MCE é aumentado em ~20% comparado com o valor do  $\Delta T_{ad}$  para o pico de 18.7K de Er puro.

### 2.1. Compostos baseados em $RCO_2$

As fases  $RCO_2$ , onde R pode assumir a função de um lantanídeo, foram largamente estudadas porque três delas exibem uma transição de primeira ordem paramagnética-ferromagnética quando  $R = Dy, Ho$  e  $Er$  enquanto que as outras fases  $RCO_2$  se tornam ferromagnéticas através de uma transição de segunda ordem. Muitos dos trabalhos realizados antes de 2000 podem ser revistos em Gschneidner e Pecharsky (2000), e Gschneidner e Pecharsky (2002). A maioria dos estudos recentes envolve a substituição de um metal de terra rara por um dos lantanídeos magnéticos ou a substituição de um metal não terra rara por Co. Mas, em conseqüência destes estudos, a maioria dos investigadores mediu  $\Delta S_M$  para a fase binária pura de  $RCO_2$  e confirmou os resultados relatados na literatura. Uma exceção foi o estudo realizado por Wang *et al.* (2002), que mediu a variação do  $\Delta S_M$  a baixos campos (4, 8 e 10 kOe); ao contrário de todos os estudos mais recentes, onde o campo magnético aplicado mais baixo era da ordem de 10 kOe ou mais alto. A variação de  $\Delta S_M$  em relação ao campo magnético aplicado para  $DyCo_2$  é mostrada na Fig. 1(a) e o  $\Delta T_{ad}$  é mostrado na Fig. 1(b) junto com alguns outros materiais.

### 2.2. Compostos à base de $RAI_2$

Somente sete artigos foram publicados nas fases  $RAI_2$  desde 1999, quatro experimentais e três teóricos. O MCE do  $GdAl_2$ ,  $TbAl_2$ ,  $(Gd_{0,6}Tb_{0,4})Al_2$  e uma série  $(Tb_{1-x}Y_x)$  das ligas  $Al_2$  foram medidos, enquanto que os cálculos teóricos do

MCE do  $\text{RAI}_2$  ( $R = \text{Pr, Nd, Tb, Dy, Ho, Er e Tm}$ ), de  $\text{DyAl}_2$  e do sistema pseudo-binário baseado em  $(\text{Dy}_{1-x}\text{Er}_x)\text{Al}_2$  foram relatados.

Os dados experimentais relatados para  $\text{GdAl}_2$ ,  $\text{TbAl}_2$  e  $(\text{Gd}_{0.6}\text{Tb}_{0.4})\text{Al}_2$  São os mais sinceros votos, consistentes com outros valores de  $\text{RAI}_2$ . Para  $(\text{Tb}_{1-x}\text{Y}_x)\text{Al}_2$  (a densidade para  $x = 0,5$  é  $4,866 \text{ g/cm}^3$ ). Estima-se que  $\Delta S_M$  é em torno de  $-90 \text{ mJ/cm}^3\text{K}$  para um  $\Delta H=50 \text{ kOe}$ , que é significativamente menor do que o valor esperado para as fases  $\text{RAI}_2$  com  $T_C=30 \text{ K}$ . Este valor é razoável desde que a concentração do metal magnético Tb, que conta para o MCE, for 50% daquele encontrado nas fases  $\text{RAI}_2$  não diluídas.

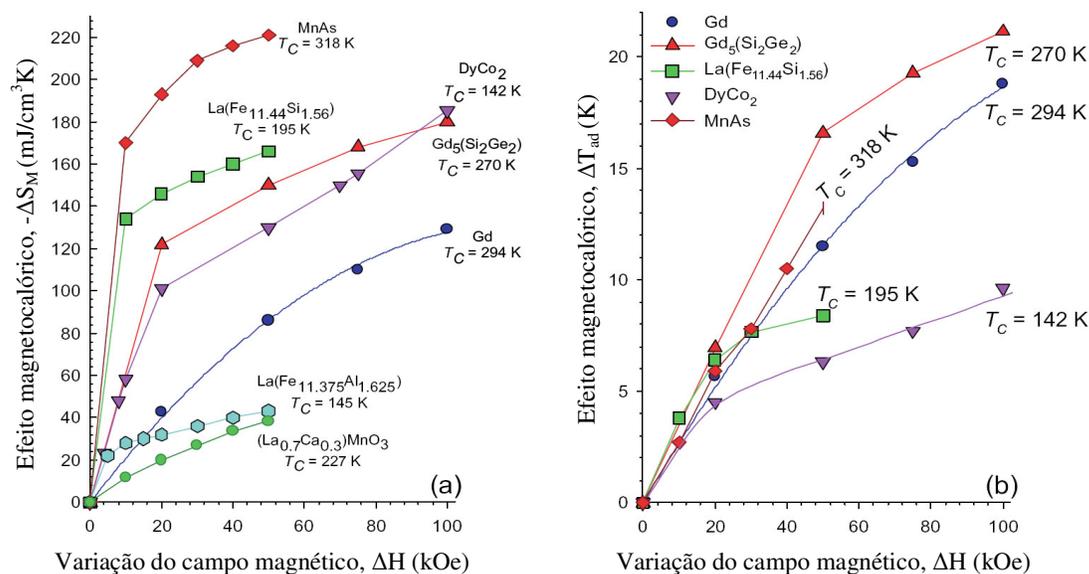


Figura 1. A mudança da entropia isotérmica em função da variação no campo magnético para o  $\text{DyCo}_2$ ,  $\text{Gd}_5(\text{Si}_2\text{Ge}_2)$ ,  $\text{La}(\text{Fe}_{11.44}\text{Si}_{1.56})$ ,  $\text{La}(\text{Fe}_{11.375}\text{Al}_{1.625})$ ,  $\text{Gd}$ ,  $(\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3})\text{MnO}_3$  e  $\text{MnAs}$ . Os pontos foram retirados do trabalho de Gshneidner (2005)

O grupo brasileiro von Ranke (2001) realizou cálculos teóricos para diversos dos compostos  $\text{RAI}_2$ . Calcularam  $\Delta S_M$  para as fases  $\text{RAI}_2$  onde  $R = \text{Pr, Nd, Tb, Dy, Ho, Er e Tm}$ . Os valores teóricos para o  $\text{ErAl}_2$  estavam perfeitamente de acordo com resultados experimentais e com uma boa aproximação para o  $\text{DyAl}_2$ . Os valores experimentais do MCE para outros  $\text{RAI}_2$  não eram conhecidos até o momento, mas foi previsto que o valor máximo de  $\Delta S_M$  seria para  $\text{ErAl}_2$  e diminuiria na ordem  $\text{Ho}$  a  $\text{Dy}$  a  $\text{Tb}$  para os lantanídeos pesados com números atômicos ( $Z$ ) menores do que o  $\text{Er}$ . O valor do  $\Delta S_M$  para  $\text{TmAl}_2$  (de onde  $Z$  é menor que o do  $\text{Er}$ ) é menor do que o do  $\text{ErAl}_2$ , mas maior do que o do  $\text{HoAl}_2$ . Para os lantanídeos leves,  $\text{PrAl}_2$  e  $\text{NdAl}_2$ , os valores do MCE são menores do que para os lantanídeos pesados para os mesmos valores de  $T_C$ .

### 2.3. Compostos baseados em $\text{RNi}_2$

Dois estudos teóricos nas fases  $\text{RNi}_2$  foram realizados com  $R = \text{Pr, Nd, Gd, Tb, Dy, Ho e Er}$ . von Ranke *et al.* (2001), fazendo uso de um modelo Hamiltoniano que inclui interações anisotrópicas do campo elétrico cristalino e interações de troca, predisseram as propriedades do MCE das fases do  $\text{RNi}_2$  para  $R = \text{Pr, Nd, Gd, Tb, Ho e Er}$ . Para a fase  $\text{ErNi}_2$ , os valores teóricos do  $\Delta S_M$  estavam em excelente acordo com os experimentos e em bom acordo para a  $\Delta T_{ad}$ . As outras fases  $\text{RNi}_2$  não foram estudadas experimentalmente. A  $\Delta S_M$  máxima foi estimada e ocorrer para  $\text{HoNi}_2$ , seguido por  $\text{Tb}$ ,  $\text{Er}$ , por  $\text{Gd}$ , por  $\text{Nd}$  e por  $\text{Pr}$ . Os valores destes MCE são comparáveis com os aqueles calculados pelos mesmos autores para os compostos de  $\text{RAI}_2$  correspondentes. Os valores de  $\Delta T_{ad}$  são também máximas para o  $\text{HoNi}_2$ , mas a ordem é diferente para os valores de  $\Delta S_M$ , isto é, o valor de  $\Delta T_{ad}$  é o segundo o maior para o  $\text{ErNi}_2$ , seguido por  $\text{Dy}$ ,  $\text{Tb}$ ,  $\text{Nd}$ ,  $\text{Gd}$  e  $\text{Pr}$ . Os autores predisseram também um segundo pico nos valores do MCE em  $\sim 1.5 \text{ K}$  para o  $\text{HoNi}_2$  o que pensam ser devido a uma alta densidade de estados a baixas temperaturas. Análises semelhantes para diversos outros materiais magnetocalóricos, podem ser encontradas em Gshneidner *et al.* (2005).

### 3. Modelagem do Refrigerador Magnetocalórico

A máquina a ser explorada aqui é aquela apresentada por Heidrich e Prata (2006) e é formada por duas câmaras que contém um fluido de trabalho e são conectadas por um canal. Neste canal estão dispostos dois trocadores de calor e

entre eles um regenerador, cujas partes sólidas são constituídas por um material magnetocalórico. O fluido é bombeado de uma câmara para a outra por meio de um deslocador que está localizado entre elas. A Fig. 2 mostra o esquema de funcionamento do refrigerador magnetocalórico.

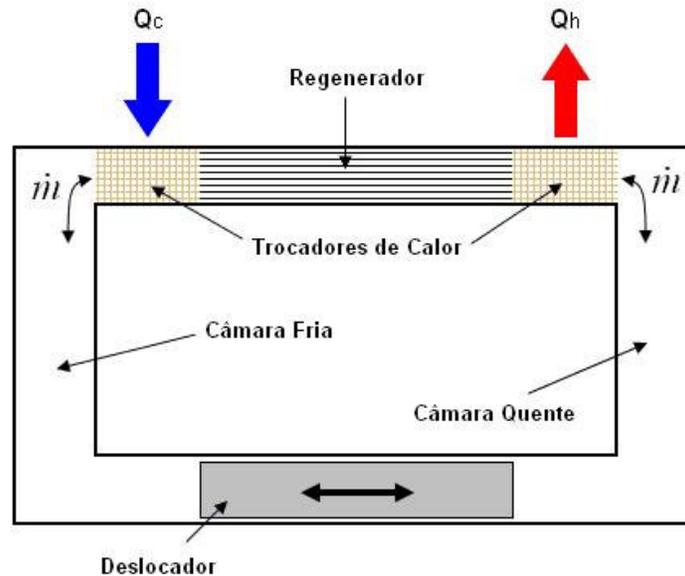


Figura 2. Esquema de funcionamento do Refrigerador Magnetocalórico

Quando o fluido passa em direção a câmara quente (sentido horário da Fig. 2) ele tem sua temperatura aumentada dentro do regenerador, que neste momento está submetido a um campo magnético. O fluido escoar então por um trocador de calor cedendo o calor recebido no regenerador para uma fonte quente. Após este processo, o deslocador inverte o seu sentido bombeando o fluido para a câmara fria (sentido anti-horário). Neste momento o regenerador não está mais sob a ação de um campo magnético e sua temperatura é menor do que a do fluido de trabalho. Por conseguinte, o fluido de trabalho perde calor para o regenerador e na saída do regenerador o fluido escoar por outro trocador de calor retirando calor de uma fonte fria. Na seqüência o deslocador inverte novamente o seu sentido reiniciando o ciclo.

O modelo proposto por Heidrich e Prata (2006) utiliza a água como fluido de trabalho e o material magnetocalórico empregado é o gadolínio. Os propósitos da utilização deste material, nas atuais simulações, são as suas propriedades magnetocalóricas, onde a temperatura de Curie é verificada próxima à temperatura ambiente, possibilitando a sua utilização de maneira mais eficaz em refrigeradores domésticos e aparelhos de ar condicionado, pelo seu baixo custo, sendo, em virtude disso, largamente utilizado em experimentos e pelas suas propriedades térmicas já estudadas. Nas câmaras o fluido de trabalho é modelado pelas equações de estado, conservação da massa e conservação da energia. Para o gadolínio no regenerador e para o fluido de trabalho que escoar através do mesmo, são utilizadas as equações de energia de forma a modelar tanto o armazenamento de energia como os mecanismos de condução e convecção, conforme sugerido por Heidrich (2002). O regenerador é formado por placas planas paralelas e dependendo da aplicação ou não do campo magnético externo ocorre uma geração de calor e sua temperatura se torna maior ou menor do que aquela do fluido de trabalho. A fig. 3 mostra uma representação esquemática do regenerador de placas paralelas.

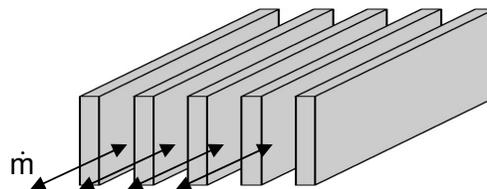


Figura 3. Regenerador de placas paralelas.

O escoamento do fluido de trabalho através do regenerador é modelado pela equação da conservação da quantidade de movimento linear, e a modelagem completa do problema requer ainda, as equações de troca de calor instantânea nos

trocadores de calor e a capacidade de refrigeração, calculada integrando o calor trocado instantaneamente no trocador de calor frio durante um ciclo.

O conjunto de equações que governa o problema não possui solução analítica e a integração numérica é obtida pelo método dos volumes finitos (Patankar, 1980). O sistema de equações é resolvido pelo método de Gauss-Seidel.

#### 4. Otimização

O desempenho do refrigerador magnetocalórico conforme explorado na seção anterior é muito afetado pela frequência e amplitude do escoamento do fluido de trabalho. Ambos os parâmetros devem estar em sintonia com a aplicação e retirada do campo magnético no regenerador, de forma que durante o aquecimento e o resfriamento do material o sentido e a magnitude do escoamento possam favorecer o correto funcionamento da máquina. Comumente a escolha da vazão e da frequência de operação do fluido de trabalho é realizada a partir de métodos convencionais de procura onde tais parâmetros são variados até que se encontre um bom resultado no indicador de desempenho da máquina. A utilização de métodos de procura do tipo tentativa e erro pode levar a ótimos locais ou a um ótimo para uma variável apenas. Isto é particularmente verdadeiro quando o ótimo local está relativamente afastado do ótimo global, conforme mostrado na Fig. 4.

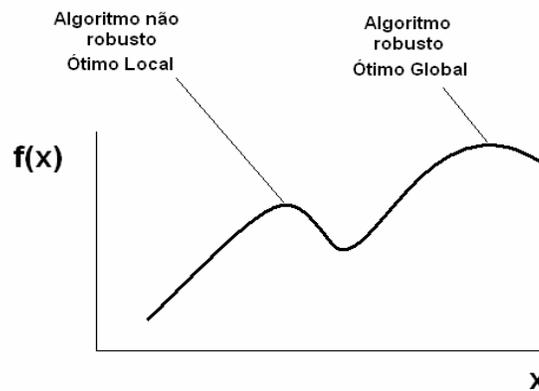


Figura 4. Representação de ótimo local e global

No contexto discutido anteriormente e visto a recente exploração do efeito magnetocalórico resolveu-se embasar melhor a otimização desta máquina. Para isto, foi utilizado o software comercial de otimização Mode Frontier da empresa ESTECO Ltda.. Para simulação do refrigerador uso é feito da metodologia apresentada em Heidrich e Prata (2006). Um documento de entrada do simulador magnetocalórico dá início ao programa executável, que gera um arquivo de saída. O software de otimização lê no arquivo de saída os resultados, armazena e determina um novo valor da variável a ser otimizada. A decisão do novo valor da variável a ser otimizada depende da natureza do algoritmo utilizado. Para o presente trabalho, uso foi feito do algoritmo genético (Coley, 1997).

Muito conhecido por sua robustez, os algoritmos genéticos, evitam que se caia em ótimos locais, e com a sua característica randômica é ideal para problemas complexos onde não se conhece o comportamento das funções. Seus parâmetros de mutação, seleção, mutação do DNA, e elitismo possibilitam a convergência para um ponto de ótimo, porém varrendo de forma segura todo o intervalo dos parâmetros a serem otimizados. Sua principal desvantagem é o tempo elevado para encontrar o ponto de ótimo, em comparação a outros métodos como o Simplex, por exemplo.

No refrigerador magnetocalórico a otimização teve como objetivo a maximização da capacidade de refrigeração, ou seja, o calor total trocado com o ambiente a ser refrigerado (trocador de calor frio). Em virtude do foco do presente trabalho no efeito magnetocalórico, o regenerador é aqui identificado pelos seus parâmetros, que estando devidamente ajustados proporciona uma melhor capacidade da máquina. Desta forma, o regenerador é o principal componente do refrigerador magnetocalórico, primordial para o efeito de refrigeração e o foco da otimização. Os parâmetros considerados na otimização foram a vazão mássica média e a frequência com que é alternado o sentido do fluido de trabalho no regenerador. O bombeamento do fluido de trabalho é feito por um movimento alternado, e a amplitude deste fluxo bem como a frequência de inversão do sentido, podem ser modificadas para refinar o funcionamento da máquina. Estes dois parâmetros são independentes e afetam a capacidade de refrigeração da máquina.

Quanto maior for o volume de fluido que circular dentro do regenerador maior é a quantidade de calor que poderá ser retirada e cedida. O calor retirado e cedido ao fluido de trabalho aumenta e reduz sua temperatura, respectivamente, e quanto maior a variação entre as temperaturas do fluido de trabalho e dos trocadores de calor maior a capacidade da máquina. Uma pequena variação de temperatura do fluido dentro do regenerador implica numa má utilização do trocador de calor, resultando, como consequência, em uma baixa capacidade. Se a frequência for muito baixa o ciclo se torna longo e a temperatura do regenerador pode se tornar igual à do fluido o que resulta em uma ausência de troca de calor. É de se esperar portanto que tanto a amplitude como a frequência com que o fluido escoar apresentem um ponto

ótimo em que a capacidade do refrigerador será maximizada. As fig. 5 e 6 mostram, respectivamente, o comportamento da capacidade de refrigeração com a variação do fluxo de massa médio e da frequência.

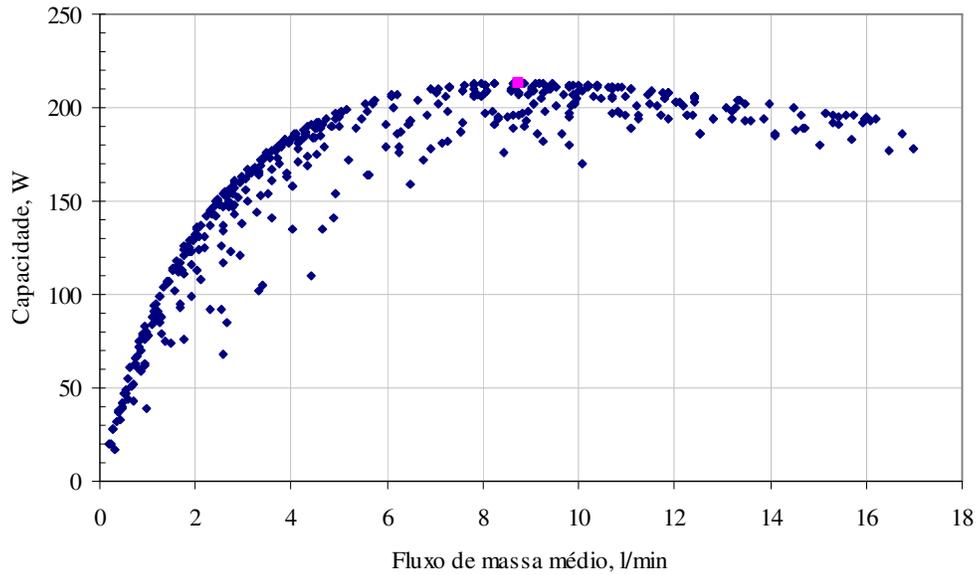


Figura 5. Ponto ótimo do fluxo de massa médio

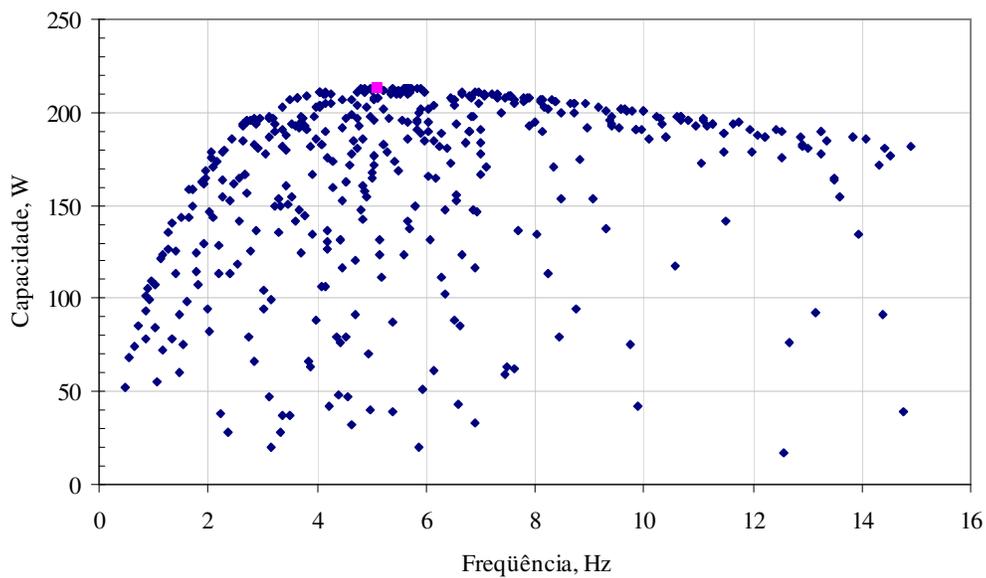


Figura 6. Ponto ótimo da frequência

Foram encontrados os pontos ótimos de amplitude e frequência do fluxo de massa para diferenças de 20, 16, 12, 8, 4, e 0 °C de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria, conforme mostrado na Fig. 7. A abscissa da figura indica a frequência em ciclos por segundo e a ordenada a amplitude média da vazão mássica em litros por minuto. Para cada diferença de temperatura imposta entre os trocadores de calor é indicado a capacidade de refrigeração obtida no ponto de operação otimizado. Como já era esperado, maiores diferenças de temperatura resultam em menores capacidades de refrigeração.

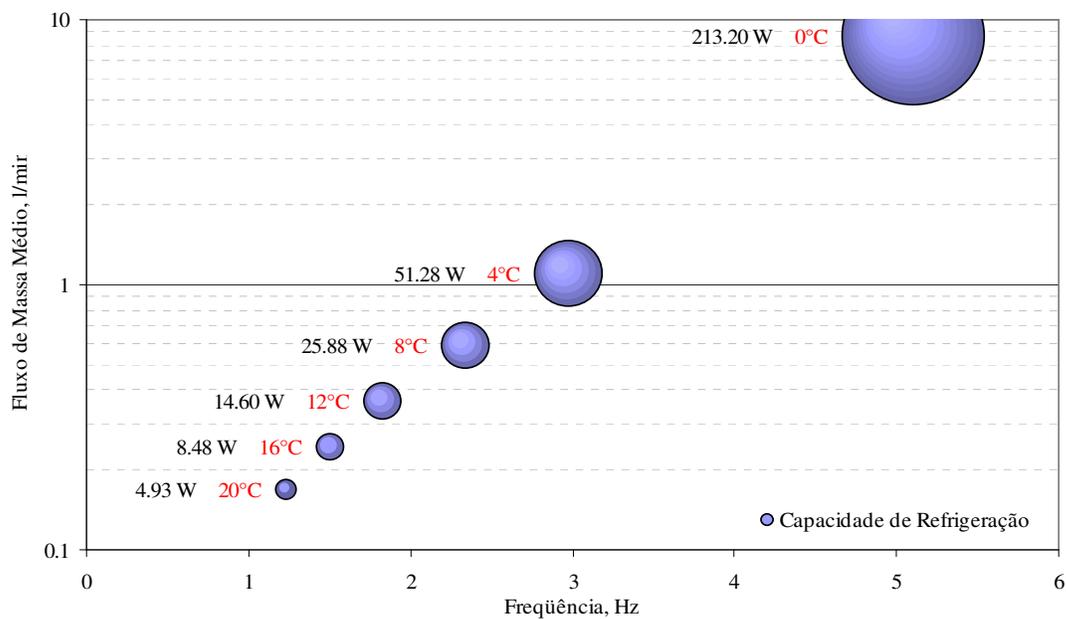


Figura 7. Pontos ótimos de amplitude média e frequência do fluxo de massa para diferentes temperaturas entre as fontes quente e fria

O valor de frequência ótimo aumentou com a redução das diferenças de temperatura. O mesmo aconteceu para a amplitude média do fluxo de massa, porém de forma mais brusca. Enquanto o valor do ponto ótimo da frequência aumentou 4x (quatro vezes) o da amplitude média aumentou na ordem de 100x (cem vezes).

Em função dos resultados obtidos, observa-se que para a configuração utilizada no presente trabalho a máxima capacidade de refrigeração possível para o refrigerador é de aproximadamente 200 W.

## 5. Conclusão

O presente trabalho investigou a otimização de um regenerador magnetocalórico, para duas variáveis de operação, a amplitude média e a frequência de inversão da vazão mássica. Os resultados foram obtidos para diferenças de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria variando de 20 a 0 °C. Para o caso investigado a máxima capacidade de operação encontrada foi de 213 W. Observou-se uma grande dependência entre a capacidade de refrigeração e a diferença de temperatura de operação entre os trocadores de calor associados às fonte quente e fria. Para uma diferença de temperatura entre as fontes quente e fria a capacidade de refrigeração encontrada foi de 4,9 W. O algoritmo de otimização utilizado mostrou-se adequado e como continuação deste trabalho outras variáveis da máquina devem ser otimizadas tais como as dimensões do regenerador..

## 6. Agradecimentos

O presente trabalho teve o suporte da Empresa Brasileira de Compressores, EMBRACO, da Financiadora de Estudos e Projetos, FINEP, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior, CAPES, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq.

## 7. Referências Bibliográficas

- Chernyshov, A. S., Tishin, A. M., Gschneidner, K. A. Jr., Pecharsky, A. O., Pecharsky, V. K., Lograsso, T. A., 2002, "Magnetothermal properties of single crystal dysprosium", *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 48, p. 19.
- Coley, D. A., 1997, "An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers", Word Scientific Publishing Co.
- Dai, W., Shen, B. G., Li, D. X., e Gao, Z. X., 2000, "New magnetic refrigeration materials for temperature range from 165 K to 235 K", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 311, p. 22.
- Gschneidner, K. A. Jr. e Pecharsky, V. K., 2000, "Magnetocaloric Materials", *Annual Review of Materials Science*, Vol. 30, pp. 387-429.
- Gschneidner, K. A. Jr. e Pecharsky, V. K., 2002, "Intermetallic Compounds, Principles and Practice", ed J H Westabook and R L Fleischer (New York: Wiley), Vol. 3, p. 519.

- Gschneidner, K. A. Jr., Pecharsky V. K., Tsokol A. O., 2005, "Recent developments in magnetocaloric materials", Bristol: Institute of Physics Publishing.
- Heidrich, J. W. F., 2002, "Modelagem e Análise Computacional de uma Máquina Stirling de Pistão Livre", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.
- Heidrich, J. W. F. e Prata, A. T., 2006, "Refrigeração Magnetocalórica e sua Aplicação em Temperatura Ambiente", 11º Encontro Nacional de Ciências Térmicas – ENCIT 2006.
- Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill Book Company;
- Tishin A. M. e Spichkin, Y. I., 2003, "The Magnetocaloric Effect and its Applications", Bristol: Institute of Physics Publishing.
- von Ranke, P. J., de Oliveira, N. A., Costa, M. V. T., Nóbrega, E. P., Caldas, A., de Oliveira, I. G., 2001, "The influence of crystalline electric field on the magnetocaloric effect in the series  $RAI_2$  (R=Pr, Nd, Tb, Dy, Ho, Er, and Tm)", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.*, Vol. 226-230, pp.970-972.
- von Ranke, P. J., Nobrega, E. P., de Oliveira, I. G., Gomes, A. M., Sarthour, R. S., 2001, "Influence of the crystalline electrical field on the magnetocaloric effect in the series  $RNi_2$  (R=Pr, Nd, Gd, Tb, Ho, Er)", *Physics Review B*, Vol. 63, n° 184406.
- Wang, D., Huang, S., Han, Z., Su, Z., Wang, Y., Du, Y., 2004, "The Magnetic Entropy changes in  $Gd_{1-x}B_x$  alloys", *Solid State Communications*, Vol. 97, p. 131.
- Wu, Y. L., Pecharsky, A. O., Pecharsky, V. K., Gschneidner, K. A. Jr., 2002, "Effect of praseodymium additions on the magnetothermal properties of erbium", *Adv. Cryogenic Engineering*, Vol. 48, pp. 3-10;
- Wang, D. H., Tang, S. L., Liu, H. D., Gao, W. L., Du, Y. W., 2002, "Large low-field magnetic entropy change in  $DyCo_2$ ", *Intermetallics*, Vol. 10, pp. 819-821.

## **REGENERATOR OPTIMIZATION FOR OPERATION WITH MAGNETOCALORIC REFRIGERATION**

Rafael P. Teixeira

POLO - Research Laboratories for Emerging Technologies in Cooling and Thermophysics  
Department of Mechanical Engineering  
Federal University of Santa Catarina – UFSC  
88.040-900 Florianópolis, SC - Brazil  
rafaelptx@polo.ufsc.br

Juliano W. F. Heidrich

POLO - Research Laboratories for Emerging Technologies in Cooling and Thermophysics  
Department of Mechanical Engineering  
Federal University of Santa Catarina – UFSC  
88.040-900 Florianópolis, SC - Brazil  
juliano@polo.ufsc.br

Alvaro T. Prata

POLO - Research Laboratories for Emerging Technologies in Cooling and Thermophysics  
Department of Mechanical Engineering  
Federal University of Santa Catarina – UFSC  
88.040-900 Florianópolis, SC - Brazil  
prata@polo.ufsc.br

### **Abstract**

The present work deals with the optimization of some parameters related to the regenerator in a refrigerator that operates making use of the magnetocaloric effect. The magnetocaloric effect has not been successfully explored in refrigerator near ambient temperature, but due to the advances in new materials could become a competitive technology in a near future. Some metals when submitted to an external magnetic field experience an increase in their temperatures which are subsequently decreased when the field is removed. Such behavior is known as the magnetocaloric effect and will be briefly discussed in this work. Further, some generalities pertaining to magnetocaloric materials are introduced and a machine is proposed to make use of this technology. The proposed machine operates in a closed loop having a working fluid that circulates in one direction and the other, depending on the pump that drives the fluid at a specific amplitude and frequency. Depending on the direction of the fluid flow heat is removed from or delivered to external reservoirs. For each particular temperature difference between the hot and cold reservoirs optimum values of mass flow rate magnitudes and frequencies can be obtained. Those values were encountered making use of a genetic algorithm optimization procedure, and it was found that for the present refrigerator the cooling capacity is limited to a value of 213 W.

Keywords: Magnetocaloric, Refrigeration, Optimization.