

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ARMAZENAMENTO DE CALOR LATENTE NUM SISTEMA DE TERMOACUMULAÇÃO TIPO LEITO FIXO.

## Jorge R. Henríquez

Depto. de Engenharia Mecânica – CTG - Universidade Federal de Pernambuco – Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cid. Universitária, Recife-PE, Brasil, Fax: 55-81-2126-8232, rjorgeh@demec.ufpe.br

## Malvino André da Silva Jr.

Depto. de Engenharia Mecânica – CTG - Universidade Federal de Pernambuco – Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cid. Universitária, Recife-PE, Brasil, Fax: 55-81-2126-8232, rjorgeh@demec.ufpe.br

## José C. Charamba Dutra

Depto. de Engenharia Mecânica – CTG - Universidade Federal de Pernambuco – Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cid. Universitária, Recife-PE, Brasil, Fax: 55-81-2126-8232, charamba@ufpe.br

## Kamal A. R. Ismail

Depto de Engenharia Térmica e Fluidos - FEM - Unicamp – Cid. Universitária Zeferino Vaz, Barão Geraldo, Campinas-SP, Brasil, Fax: 55-19-32893722, kamal@fem.unicamp.br

**Resumo:** Este trabalho apresenta um modelo numérico para simular um sistema de armazenamento térmico formado por cápsulas esféricas preenchidas com água dentro de um tanque cilíndrico e um fluido de trabalho circulando entre as cápsulas. O modelo proposto é unidimensional e transiente, e consiste em dividir o tanque na direção axial num conjunto de camadas iguais cuja altura é sempre maior ou igual ao diâmetro de uma cápsula. A solução numérica do modelo é realizada usando o método de diferenças finitas com uma técnica de marcha na direção axial do armazenador e a solução do problema de mudança de fase dentro das cápsulas esféricas é acoplada através de um balanço de energia entre as cápsulas e o fluido de trabalho. O processo de solidificação dentro das cápsulas é tratado usando um modelo condutivo unidimensional com mudança de fase com condições de contorno convectivas na superfície externa da cápsula. O modelo foi usado para investigar o efeito do tamanho das cápsulas, vazão do fluido de trabalho e temperatura de entrada do fluido de trabalho sobre a fração de massa solidificada e sobre o tempo para carregamento completo do armazenador.

**Palavras chaves:** Armazenamento térmico, Solidificação, Simulação numérica, Banco de gelo

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de técnicas de armazenamento de energia térmica permite aumentar a flexibilidade de operação em processos industriais, refrigeração e ar condicionado, sistemas de cogeração, recuperação de energia térmica e outros setores que fazem uso extensivo de calor e onde a disponibilidade de energia térmica não coincide com o perfil de demanda no tempo. Diversos sistemas de armazenamento térmico foram desenvolvidos e estudados nos últimos anos o que tem resultado numa grande variedade de soluções tecnológicas envolvendo tanto o conceito de calor latente quanto o conceito de calor sensível. Os sistemas de armazenamento de energia baseados no

conceito de calor latente apresentam como vantagem uma maior capacidade de armazenamento de energia por unidade de volume, quando comparados aos sistemas de armazenamento por calor sensível.

Uma aplicação particular do conceito de armazenamento de energia são os bancos de gelo, usados em sistemas integrados de refrigeração e ar condicionado para uso em prédios residenciais, escritórios, centros comerciais e indústrias em geral, onde o conforto térmico é um aspecto importante para o desempenho humano. O objetivo fundamental no desenvolvimento e utilização da tecnologia de bancos de gelo esta relacionada à necessidade de reduzir os picos de demanda de energia elétrica resultante do uso de sistemas de ar condicionado em grande escala. Neste tipo de equipamentos a energia térmica produzida pelo sistema de refrigeração, normalmente um chiller de absorção ou compressão, é armazenada através da solidificação de água durante o processo de carregamento do armazenador, geralmente no período noturno em que os picos de demanda de energia elétrica são menores. A recuperação e utilização desta energia são feitas pelo sistema secundário de transporte de energia onde um fluido com ponto de solidificação mais baixo do que água retira o calor armazenado, o qual será liberado durante o processo de fusão do gelo. A geometria onde ocorre o fenômeno de mudança de fase é um parâmetro importante no projeto de armazenadores térmicos e uma área de pesquisa ainda em aberto.

Existem vários tipos de sistemas de armazenamento de energia que utilizam o conceito de calor latente, com características apropriadas para cada aplicação e destinados à obtenção de máxima eficiência. Em anos recentes um grande número de estudos sobre características operacionais e conceitos de projetos tem sido publicados. Ismail *et al.*(1999) realizaram um estudo numérico e experimental sobre um banco de gelo de placa plana e investigaram o efeito de alguns parâmetros geométricos e operacionais sobre o desempenho térmico do equipamento. Outro tipo de geometria bastante difundida utiliza tubos arranjados dentro de um tanque com a solidificação ocorrendo ao redor dos tubos durante o processo de carregamento do armazenador. Variações desta mesma geometria têm sido amplamente exploradas, adicionando-se aletas radiais, axiais, posicionando os tubos num arranjo vertical ou horizontal dentro do tanque, ou ainda, uma configuração considerando tubos curvos formando uma espiral dentro do armazenador, entre outras. Algumas contribuições recentes na forma de estudos numéricos e experimentais sobre estes tipos de armazenadores podem ser encontradas nos trabalhos de Ismail(1998), Ismail *et al.*(1997, 2000), Velraj *et al.*(1997), Benta(2001) e Jeckel *et al.*(1993).

O encapsulamento do material de mudança de fase tem sido amplamente investigado para uso em armazenadores tipo leito. Nestes armazenadores o fluido utilizado para o carregamento do sistema circula por fora das cápsulas e provoca a solidificação do material no interior destas. A vantagem deste tipo de equipamentos é que apresentam uma grande área de transferência de calor, além de uma maior flexibilidade na sua capacidade de armazenamento uma vez que pode ser aumentado ou diminuído o número de cápsulas dentro do tanque de armazenamento. As cápsulas são usualmente disponíveis em formatos retangulares, cilíndricas e esféricas. As cápsulas esféricas são as mais utilizadas devido a sua melhor relação volume de energia armazenada/área de transferência de calor, assim como também, pela sua facilidade de instalação dentro do tanque o que permite obter uma porosidade de leito otimizada. Tieyi *et al.*(1996) estudaram um armazenador preenchido com cápsulas retangulares, enquanto que Bedecarrats *et al.*(1996) e Ismail e Henríquez (2002-a) reportaram um trabalho utilizando cápsulas esféricas.

Uma das principais características de um armazenador de calor latente é o processo de mudança de fase que sofre o material usado para armazenar a energia, de modo que a compreensão do processo de transferência de calor no fenômeno de solidificação/fusão é essencial para avaliar exatamente o desempenho térmico destes equipamentos. Moore e Bayazitoglu (1982) estudaram através de um modelo matemático o processo de fusão de PCM dentro de uma cavidade esférica e assumiram que a densidade da fase sólida é maior que a da fase líquida. Prud'homme *et al.*(1989) adotaram uma formulação unificada que permitiu o tratamento simultâneo da solidificação dentro de placas cilíndricos e esferas, considerando três tipos diferentes de condições de contorno. Ismail e Henríquez (2002, 2003) apresentaram uma solução numérica usando malha móvel para o problema

de solidificação dentro de uma cápsula esférica sob condições de contorno convectiva na superfície externa da cápsula, enquanto que Cho e Choi (2000) investigaram experimentalmente o comportamento térmico de parafina dentro de cápsulas esféricas durante o processo de solidificação e fusão.

Este trabalho apresenta um estudo numérico do processo de armazenamento de energia térmica num sistema formado por um conjunto de cápsulas esféricas preenchidas com água dentro de um tanque cilíndrico. Um fluido numa temperatura menor que a temperatura de mudança de fase da água entra no armazenador e percorre o leito fixo de esferas trocando calor com a superfície das cápsulas e provocando o resfriamento e solidificação da água contida. As equações diferenciais que compõem o modelo são resolvidas numericamente pelo método de diferenças finitas e através de uma técnica de marcha ao longo da direção axial do armazenador. O modelo proposto foi utilizado para estudar alguns parâmetros operacionais e geométricos do sistema e a sua influência no desempenho do armazenador.

## 2. MODELO MATEMÁTICO

A Fig. (1) mostra um esquema do sistema de armazenamento térmico estudado. Este sistema consiste de um tanque cilíndrico de altura  $L$  e diâmetro  $D$ , ambos em [m], preenchido com cápsulas esféricas arranjadas em camadas dentro do tanque. As cápsulas esféricas contêm água que será solidificada pela circulação de um fluido de trabalho que entra no tanque numa temperatura inferior à temperatura de mudança de fase da água. O fluido de trabalho percorre o leito fixo formado pelas cápsulas esféricas no tanque, provocando, num primeiro momento, o resfriamento da água contida nas cápsulas até o ponto em que esta alcança a sua temperatura de mudança de fase, dando assim inicio, num segundo momento, ao processo de solidificação da mesma. Na formulação matemática do problema, o tanque com as cápsulas esféricas é dividido na direção axial em  $N$  camadas, cada uma de altura igual ao diâmetro de uma cápsula esférica. Para facilitar a análise assume-se que: i) o tanque é perfeitamente isolado; (ii) somente há variação de temperatura ao longo da direção axial; iii) a temperatura do fluido de trabalho em cada camada é constante e uniforme.

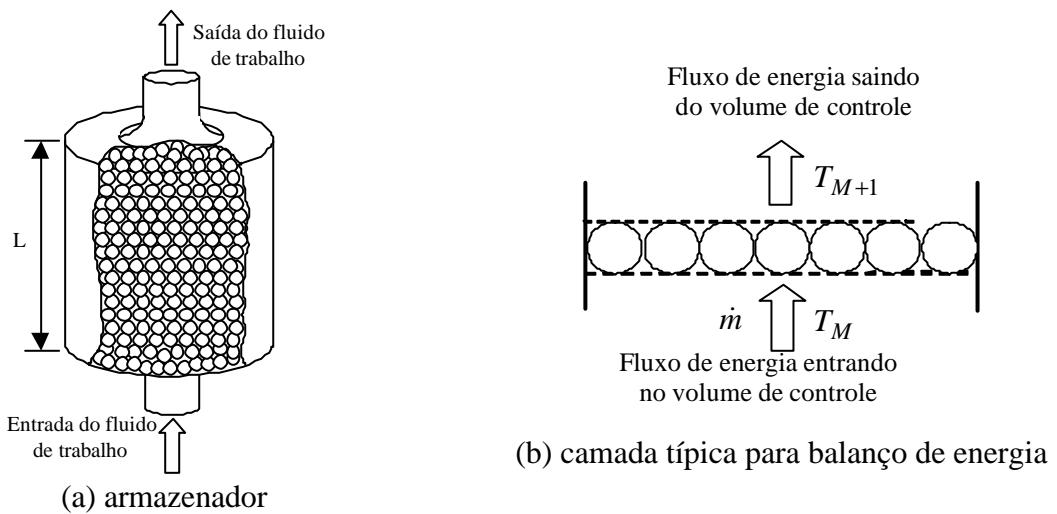


Figura 1. Esquema do sistema estudado.

Promovendo balanços de energia em cada camada como mostra a Fig. 1b, resulta na seguinte equação diferencial.

$$rcV \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{m}c(T_M - T_{M+1}) + nQ \quad (1)$$

com  $n$  sendo a quantidade de esferas na camada;  $Q$  é o calor líquido trocado entre uma cápsula

esférica e o fluido de trabalho em [W];  $r$ ,  $c$  e  $V$  são a densidade [ $\text{kg m}^{-3}$ ], calor específico [ $\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] e volume do fluido de trabalho [ $\text{m}^3$ ] respectivamente;  $\dot{m}$  em [ $\text{kg s}^{-1}$ ] é a vazão mássica do fluido de trabalho;  $T_M$  e  $T_{M+1}$ , ambas em [K], são a temperatura do fluido de trabalho na entrada e saída da camada respectivamente e  $t$  em [s] é o tempo.

Escrevendo a Eq. (1) de forma discreta através do método de diferenças finitas tomando como base uma malha formada pelo número de camadas,

$$rcV \left( \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{Dt} \right) = \dot{m}c(T_M^j - T_{M+1}^j) + nQ \quad (2)$$

$T_i$  representa a temperatura do fluido no centro da camada, enquanto que  $j$  e  $j+1$  representam dois sucessivos intervalos de tempo. Assumindo que a temperatura no centro da camada ( $T_i$ ) possa ser escrita como o valor médio entre as temperaturas da entrada e saída na camada  $T_M$  e  $T_{M+1}$  respectivamente, então a Eq. (2) poderia ser rescrita da seguinte forma,

$$T_{M+1}^{j+1} = \frac{2\dot{m}Dt}{rV} (T_M^j - T_{M+1}^j) + \frac{2nQDt}{rcV} + T_M^j + T_{M+1}^j - T_M^{j+1} \quad (3)$$

A Eq. (3) pode ser estendida para cada camada, formando um sistema de  $N$  equações simultâneas. A temperatura na entrada da primeira camada  $T_{M=1}$  é conhecida e corresponde à própria temperatura do fluido de trabalho na entrada do armazenador. Esta temperatura é assumida como sendo constante. O calor trocado entre as cápsulas esféricas e o fluido de trabalho, representado pela variável  $Q$ , é determinado pelo método das resistências térmicas de acordo com a Fig. (2) e representado pela Eq. (4). Esta equação envolve uma resistência térmica devido à condução através da cápsula esférica e uma resistência devido à convecção na superfície externa da cápsula.

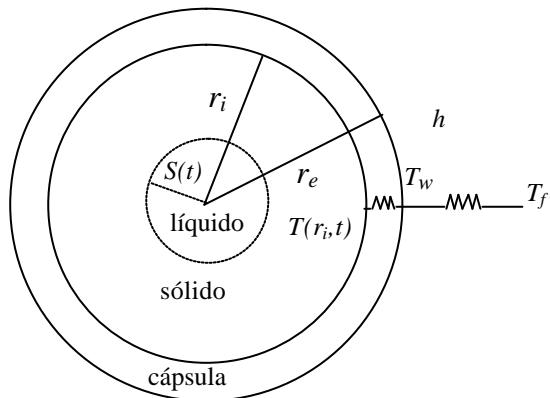


Figura 2. Representação do processo de solidificação numa cápsula esférica

$$Q = \frac{T(r_i, t) - T_{ext}}{\frac{r_e - r_i}{4pk_c r_e r_i} + \frac{1}{4ph r_e^2}} \quad (4)$$

$r_i$  e  $r_e$ , em [m], representam os raios interno e externo da cápsula esférica respectivamente.  $T(r_i, t) - T_{ext}$  é a diferença entre as temperaturas na superfície interna da cápsula e a temperatura do

fluido em contato com a superfície externa da mesma. A variável  $k_c$ , em  $[W\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}]$  é a condutividade térmica da cápsula, enquanto que  $h$  em  $[W\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}]$  é o coeficiente convectivo externo, obtido de uma correlação para o número de Nusselt,  $Nu$ , proposta por Beek (1962) para o caso de um escoamento através de esferas arranjadas de forma randômica.

$$Nu = \frac{2r_e h}{k_f} = 3.22 \text{Re}^{1/3} \text{Pr}^{1/3} + 0.117 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.8} \quad (5)$$

$k_f$  é a condutividade térmica do fluido de trabalho em  $[W\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ . O Número de Reynolds é obtido da relação  $\text{Re} = r\bar{u}(2r_e)/m$ , onde  $\bar{u}$  é a velocidade média do escoamento através do leito em  $[ms^{-1}]$  e  $m$  em  $[kg\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}]$  é a viscosidade do fluido. A vazão mássica do fluido de trabalho pode ser utilizada para calcular a velocidade média num leito de esferas de porosidade  $e$  é conhecida.  $A$ , em  $[m^2]$ , representa a área da seção transversal do armazenador.

$$\dot{m} = r\bar{u}eA \quad (6)$$

A análise do processo de solidificação dentro da cápsula e a avaliação da temperatura  $T(r_i, t)$ , necessária para calcular a transferência de calor  $Q$ , são realizadas utilizando o procedimento descrito nos trabalhos de Ismail e Henríquez (2002, 2003). Em ambos trabalhos fora estudada a solidificação no interior de uma cápsula esférica submetida a uma condição de contorno convectiva. A resolução foi baseada num modelo unidimensional de condução pura com mudança de fase. Os efeitos convectivos na fase líquida do material de mudança de fase contido na cápsula esférica são levados em consideração através de um coeficiente de condutividade térmica efetivo na equação da condução aplicada a esta região. Resultados numéricos produzidos com esse modelo foram comparados com resultados experimentais obtidos pelos mesmos autores, obtendo-se uma concordância satisfatória entre os resultados. Cabe aqui ressaltar que o modelo no inclui o fenômeno de super-resfriamento, que ocorre freqüentemente em processos de solidificação. Na prática este efeito pode ser reduzido ou evitado adicionando agentes nucleantes ao material de mudança de fase. Num trabalho de Chen et al.(1999) sobre a solidificação de água dentro de cápsulas cilíndricas, os autores demonstram que grau de super-resfriamento depende da temperatura do fluido externo e do tamanho das cápsulas.

### 3. METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO DO MODELO

A solução do problema aqui descrito envolve a resolução de um sistema de  $N$  equações, que correspondem ao cálculo da temperatura em cada camada de fluido, e da solução do problema de solidificação dentro das cápsulas esféricas. Isto pode ser abordado como a resolução de dois problemas simultâneos, cujas soluções são acopladas através do balanço de energia entre o fluido de trabalho e as cápsulas contendo o material de mudança de fase. O procedimento de cálculo se da através de uma técnica de marcha a partir da primeira camada do leito (entrada do fluido de trabalho no armazenador) até a última camada do mesmo, onde o fluido de trabalho deixa o armazenador. Em cada camada o processo de solução é iterativo por causa do acoplamento entre as duas soluções e se estende até satisfazer um balanço de energia em cada camada. No instante inicial todo o sistema se encontra em equilíbrio térmico, incluindo as cápsulas e o material de mudança de fase contido nelas. Nos instantes seguintes um fluido de trabalho numa temperatura menor do que a temperatura de mudança de fase da água contida nas cápsulas, entra no armazenador iniciando-se o processo de carregamento do sistema. Assume-se que a temperatura do fluido na camada é uniforme e igual ao valor médio entre as temperaturas do fluido saindo e entrando da mesma. Para a primeira camada esta temperatura será  $(T_1 + T_2)/2$ , com  $T_1$  conhecida uma vez que é a própria

temperatura do fluido de trabalho na entrada do armazenador, representando assim a condição de contorno do problema. Com o valor estimado da temperatura do fluido na camada, podemos resolver o problema de solidificação no interior de uma esfera e posteriormente calcular o calor  $Q$  trocado entre o fluido e a cápsula. Em seguida, através da Eq. (3), calcula-se um novo valor para  $T_2$  que será comparado com o da iteração anterior. Caso a diferença entre estes ultrapasse um certo valor tido como convergência da solução, deve-se recalcular uma nova temperatura média tomando como base o último valor de  $T_2$  e resolver novamente o problema de solidificação na cápsula esférica. Esta seqüência de cálculos continua até alcançar a convergência da solução para a primeira camada. Uma vez conseguido este objetivo, o mesmo procedimento é repetido nas demais camadas do sistema de forma consecutiva e seqüencial da primeira até a última camada do leito. Finalizada a primeira varredura e estando de posse do primeiro perfil de temperatura do leito, é dado um passo de tempo e reinicia-se todo o processo de cálculo até o carregamento completo do sistema. É de esperar que as cápsulas esféricas que preenchem as primeiras camadas do leito atingem um estado de completa solidificação antes do que as cápsulas contidas nas últimas camadas do leito. Neste caso, as cápsulas esféricas solidificadas continuarão armazenando energia na forma de calor sensível e isto será computado através de uma análise da transferência de calor sem mudança de fase. O estado de carregamento completo é alcançado quando o armazenador apresenta um perfil de temperatura constante e igual à temperatura de entrada do fluido de trabalho.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

As equações que conformam o modelo tem sido programadas em Fortran 90 numa estrutura flexível que permite introduzir modificações e agregar especificidades de forma rápida e fácil ao modelo principal. Os modelos da transferência de calor no leito e do processo de solidificação da água nas cápsulas tem sido programados em sub-rotinas independentes que se comunicam mutuamente através de variáveis específicas gerenciadas por um programa principal. O programa tem sido utilizado para estudar diversos parâmetros de interesse envolvidos no processo de armazenamento térmico e para verificar como estes afetam o desempenho do armazenador. Assim, foram realizadas simulações com o intuito de investigar o efeito da temperatura de entrada e a vazão do fluido de trabalho sobre a fração de massa solidificada e o efeito do tamanho das cápsulas esféricas sobre este mesmo parâmetro. A fração de massa solidificada foi determinada a partir do monitoramento da quantidade de material de mudança de fase solidificada ( $M_{sol}$ ) e dividindo esta quantidade pela massa total ( $M_{total}$ ) que poderia ser solidificada quando o armazenador fosse completamente carregado.

$$m^* = \frac{M_{sol}}{M_{total}} \quad (7)$$

Nas simulações realizadas para verificar o efeito do tamanho das cápsulas, foi tomado o cuidado de evitar que a quantidade de massa do material de mudança de fase varia-se com a mudança de tamanho das cápsulas. Para isto manteve-se a mesma porosidade do leito para todas as simulações ( $\epsilon = 0,38$ ). Em todas as simulações realizadas neste estudo a altura do armazenador foi admitida como sendo igual 1,5 m e o diâmetro do mesmo igual a 0,92 m. O material das cápsulas foi considerado como sendo polietileno e a espessura da parede das cápsulas igual a 2 mm. O fluido de trabalho utilizado foi uma mistura de etileno glicol e água numa concentração de 30% em volume.

A variação da temperatura com o tempo, para diferentes posições na direção axial do leito, são mostradas no gráfico da Fig. (3). As curvas representadas no gráfico mostram a evolução da temperatura para uma posição imediatamente depois da entrada do fluido de trabalho, altura média do armazenador e na saída do mesmo. A Fig. (4) mostra a distribuição da temperatura na direção axial do leito para diferentes instantes de tempo. Ambos gráficos representam curvas típicas que

podem ser obtidas com o modelo e que podem fornecer informações importantes ao respeito da condição do armazenador no que diz respeito a estado de carregamento deste. Sendo ambos gráficos construídos com informações da mesma simulação, de ambos pode ser inferido que o armazenador será completamente carregado após 8 horas, como indicado pela curva relativa à temperatura na saída do armazenador na Fig. (3) e a curva referenciada de “8 horas” na Fig. (4).

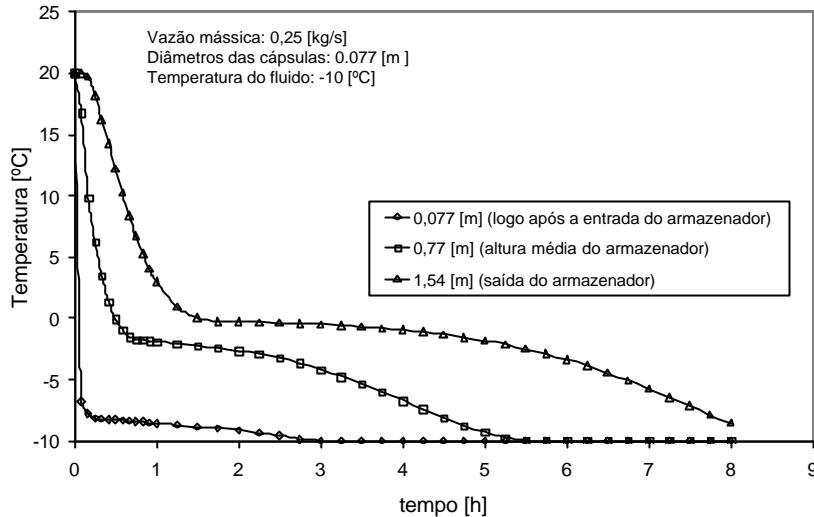


Figura 3. Histórico de temperaturas em três posições diferentes do armazenador.

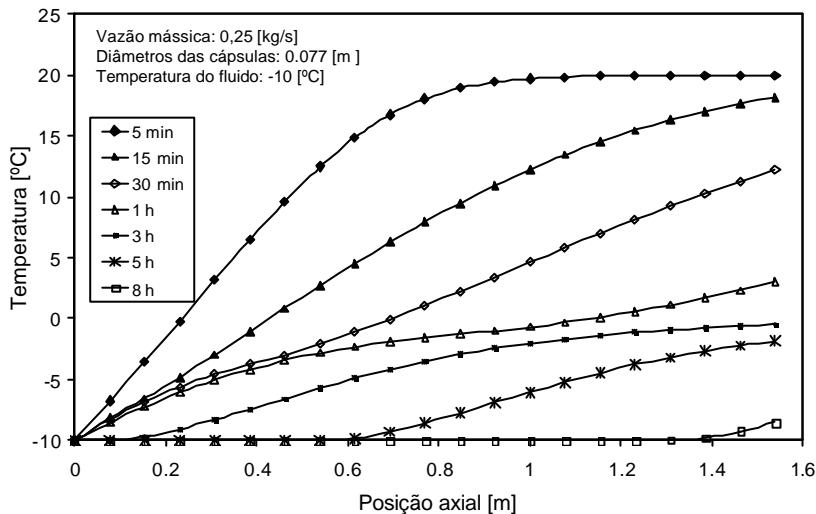


Figura 4. Perfil de temperatura na direção axial do armazenador em função do tempo.

O efeito da vazão mássica sobre a fração de massa solidificada é mostrado na Fig. (5). Do gráfico pode ser inferido que o aumento da vazão provoca uma diminuição no tempo de carregamento do armazenador. Fazendo uma comparação direta entre a curva para uma vazão de 0,44 kg/s e a curva para uma vazão de 0,25 kg/s podemos observar que o carregamento do armazenador é acelerado em aproximadamente 3 horas quando usada a primeira vazão. Para verificar o efeito do tamanho das cápsulas sobre a fração de massa solidificada foram realizadas simulações com cápsulas de 55, 77 e 110 mm de diâmetro. O resultado destas simulações é mostrado no gráfico da Fig. (6) e aponta que o uso de cápsulas menores melhora o desempenho do processo de carregamento do armazenador.

O efeito da temperatura de entrada do fluido de trabalho é observado comparando-se as curvas da Fig. (7). Uma comparação direta destas curvas indica que o processo de carregamento se torna mais demorado para valores maiores da temperatura de entrada do fluido de trabalho. Da figura pode-se inferir que para o caso em que a temperatura de entrada do fluido de trabalho é de -15 °C, o tempo de carregamento completo do armazenador é de aproximadamente 5,5 horas, enquanto que,

quando a temperatura do fluido de trabalho é aumentada para -5 °C o carregamento do armazenador é de aproximadamente 40% da sua capacidade para esse mesmo tempo.

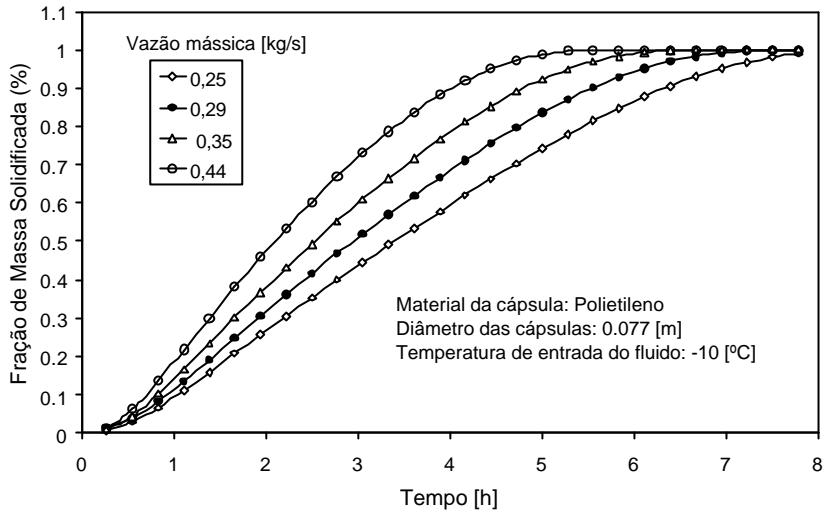


Figura 5. Efeito da vazão mássica sobre a fração de massa solidificada.

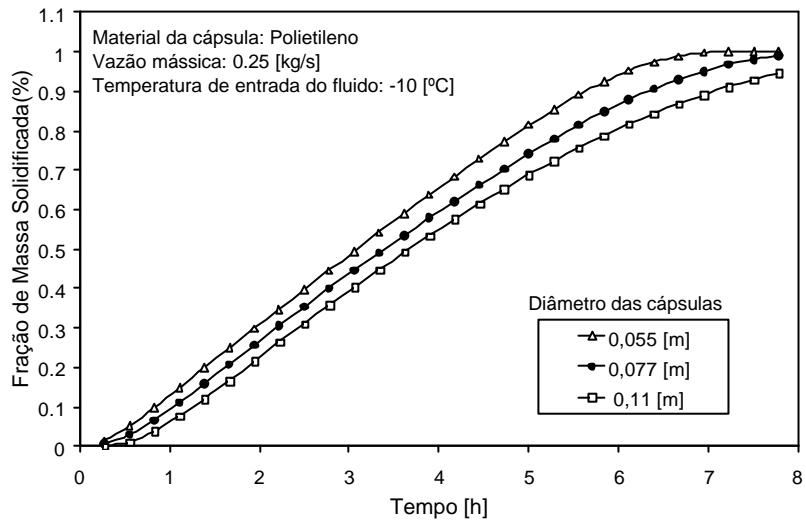


Figura 6. Efeito do tamanho das cápsulas sobre a fração de massa solidificada.

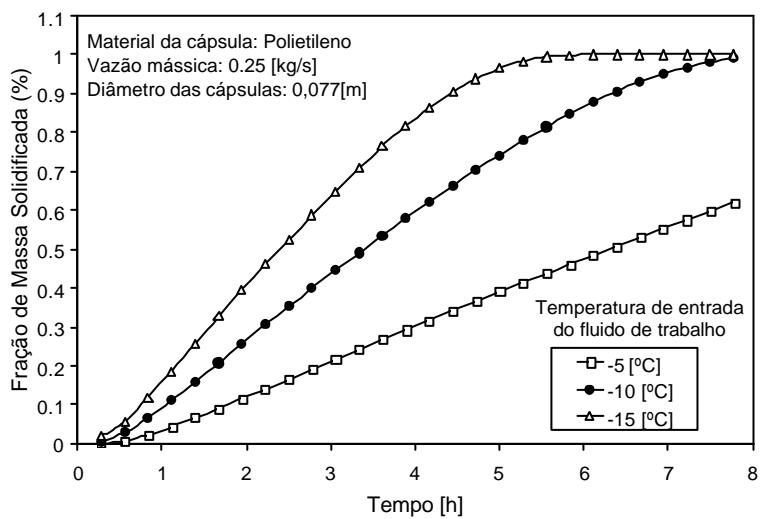


Figura 7. Efeito da temperatura do fluido de trabalho sobre a fração de massa solidificada.

## **5. CONCLUSÕES**

Foi implementado e resolvido numericamente através do método de diferenças finitas um modelo matemático para a simulação do processo de armazenamento de calor num sistema formado por uma tanque contendo cápsulas esféricas preenchidas com material de mudança de fase. O processo de solidificação dentro das cápsulas também foi resolvido numericamente utilizando-se o método de diferenças finitas com uma técnica de malha móvel. Resultados mostram que a temperatura de entrada do fluido de trabalho exerce uma forte influência sobre o tempo de carregamento do armazenador.

O aumento da vazão do fluido de trabalho e a diminuição no tamanho das cápsulas esféricas levam a um decréscimo no tempo total de carregamento do armazenador. Valores ótimos para estes parâmetros devem ser investigados junto com considerações ao respeito da capacidade e custos de bombeamento do sistema devido ao aumento de perda de carga que ambos devem provocar.

## **6. AGRADECIMENTOS**

Os autores desejam agradecer ao CNPq pelo suporte financeiro.

## **7. REFERÊNCIAS**

- Bedecarrats, J.P., Strub, F., Falcon, B. and Dumas, J.P., 1996, "Phase-change thermal energy storage using spherical capsules: performance of a test plant", Int. Journal of refrigeration, Vol. 19, No. 3, pp. 187-196.
- Beek, J., 1962, "Design of Packed Catalytic Reactors, Advances in Chemical Engineering", Vol. 3, pp. 203-271.
- Benta, E.S., 2001, "Estudo experimental e numérico da solidificação da água ao redor de tubos curvos", Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil,
- Chen, S.L., Wang, P.P. and Lee, T.S., 1999, "An experimental investigation of nucleation probability of supercooled water inside cylindrical capsules", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.18, pp. 299–306.
- Cho, K. and Choi, S.H., 2000, "Thermal characteristics of paraffin in a spherical capsule during freezing and melting processes", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 43, pp. 3183-3196.
- Ismail, K.A.R., Henríquez, R. and da Silva, T.M., 2003, "A parametric study on ice formation inside a spherical capsule, International Journal of Thermal Sciences", Vol. 42, pp. 881–887.
- Ismail, K.A.R. and Henríquez, R., 2002-a, "Numerical and experimental study of spherical capsules packed bed latent heat storage system", Applied Thermal Engineering, Vol. 22, pp.1705–1716
- Ismail, K.A.R. e Henríquez, R., 2002-b, "Solidificação de água no interior de uma cápsula esférica", CONEM 2002, 12-16 Agosto, João Pessoa, PB, Brasil.
- Ismail, K.A.R., 1998, "Bancos de Gelo: Fundamentos e Modelagem", Campinas-SP, Brasil.
- Ismail, K.A.R., Henríquez, J.R., Moura, L.F.M. and Ganzarolli, M.M., 2000, "Ice formation around isothermal radial finned tubes", Energy Conversion & Management, Vol. 41, pp. 585-605.
- Ismail, K.A.R., Micaroni, F.N. and Henríquez, J.R., 1997, "A parametric study of an ice-on-coil storage unit", 4th Int. Conference on Moving Boundaries: Computational modelling of free and moving boundary problems, Eds. R. Van Keer and C.A. Brebbia, Ghent, Belgium, pp. 133-142.
- Ismail, K.A.R., Quispe, O.C. and Henríquez, J.R., 1999, "A numerical and experimental study on a parallel plate ice bank", Applied Thermal Engineering, Vol. 19, No. 2, pp.163-193.
- Jeckel, T.B. Mitchell, J.W. and Klein, S.A., 1993, 'Modelling of ice-storage tanks", ASHRAE Transaction, Vol. 99, part 1, pp. 1016-1023.
- Moore, F.E. and Bayazitoglu, Y., 1982, "Melting within a spherical enclosure", Journal of Heat Transfer, Vol. 104, pp. 19-23.
- Prud'homme, M., Nguyen, T.H., and Nguyen, D.L., 1989, "A heat transfer analysis for solidification of slabs, cylinders, and spheres", Journal of Heat Transfer, Vol. 111, pp. 699-705.

- Tieyi, G., Yinping, Z. and Xinshi, G., 1996, "Theoretical analysis of heat transfer in a cool storage tank filled with rectangular enclosures containing phase change material", Heat Transfer Science and Technology, Ed. W. Buxuan, Higher Education Press, Beijin, China, pp. 734-739.
- Velraj, R., Seeniraj, R.V., Hafner, B., Faber, C. and Schwarzer, K., 1997, 'Experimental analysis and numerical modeling of inward solidification on a finned vertical tube for a latent heat storage unit", Solar Energy, Vol. 60, pp. 281-290.

## **8. DIREITOS AUTORAIS**

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## **NUMERICAL SIMULATION OF LATENT HEAT STORAGE IN A FIXED BED THERMAL STORAGE SYSTEM**

### **Jorge R. Henríquez**

Depto. de Engenharia Mecânica – CTG - Universidade Federal de Pernambuco – Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cid. Universitária, Recife-PE, Brasil, Fax: 55-81-2126-8232, rjorgeh@demec.ufpe.br

### **Malvino André da Silva Jr.**

Depto. de Engenharia Mecânica – CTG - Universidade Federal de Pernambuco – Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cid. Universitária, Recife-PE, Brasil, Fax: 55-81-2126-8232, rjorgeh@demec.ufpe.br

### **José C. Charamba Dutra**

Depto. de Engenharia Mecânica – CTG - Universidade Federal de Pernambuco – Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cid. Universitária, Recife-PE, Brasil, Fax: 55-81-2126-8232, charamba@ufpe.br

### **Kamal A. R. Ismail**

Depto de Engenharia. Térmica e Fluidos - FEM - Unicamp – Cid. Universitária Zeferino Vaz, Barão Geraldo, Campinas-SP, Brasil, Fax: 55-19-32893722, kamal@fem.unicamp.br

**Abstract:** This paper presents a numerical model to simulate a thermal storage system composed of spherical capsules filled with water inside a cylindrical tank and a working fluid circulating between the capsules. The simplified transient one-dimensional model is based on dividing the tank into a numbers of axial layers whose thickness is always equal or larger than a capsule diameter. The numerical solution of the model is realized by the finite difference method and determined by a marching technique in which the solution of the phase change problem inside a spherical capsule is coupled through an energy balance between the capsules and the working fluid. The solidification process inside the spherical capsule is treated using a conductive one-dimensional phase change model with convective boundary condition on the external surface. The model was used to investigate the effects of the size of the shell, the flow rate of the working fluid and the working fluid entry temperature on the solidified mass fraction and the time for the complete charging of the storage system.

**Keywords:** Thermal storage, Solidification, Numerical simulation, Ice bank