

DESCRIÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE FUSÃO EM UM TANQUE DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO

Paulo Henrique de Andrade Marinho Torres – paulotorreseng@gmail.com

Esly Ferreira da Costa Junior

Andréa Oliveira Souza da Costa

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo. Um tanque cilíndrico de armazenamento energético, presente em um sistema de aquecimento, é estudado neste trabalho. O emprego de um material que sofre mudança de fase em um tanque de armazenamento energético permite o uso de tanques menores, já que o calor latente de fusão é muito superior ao calor sensível, para as variações de temperatura obtidas com coletores solares. A fim de prever o comportamento diurno do tanque, período no qual a energia é continuamente armazenada, emprega-se um modelo da literatura baseado no método entalpia. Com modificações na estratégia de resolução numérica da literatura, propõe-se uma correção na equação empregada para a entalpia de modo a torná-la contínua e também a integração direta do sistema de equações algébrico-diferenciais, resultante da discretização do modelo nas 2 direções espaciais em volumes finitos, num integrador comercial do MATLAB. A rotina de integração empregada permite o controle dos erros, o que é mais difícil de ser realizado empregando-se o método de Euler Implícito usado no trabalho da literatura. Mais além, nesta nova metodologia, não se faz mais necessário o uso de propriedades constantes (calores específicos e condutividades térmicas). O sistema simulado emprega CCHH (Cloreto de Cálcio Hexahidratado) no tanque de armazenamento e água como fluido de transferência de calor. O tempo simulado de fusão completa foi empregado para a análise de convergência da malha e considerou-se convergida a solução com 17 divisões tanto na direção radial quanto axial. A diferença de cerca de 10% no tempo de fusão em relação ao obtido na literatura pode estar associado ao uso de um método de 1ª ordem para a integração temporal pelos autores. Apresentam-se os perfis temporais, radiais e axiais de temperatura no tanque e verificou-se que todos são coerentes fisicamente.

Palavras-chave: Armazenamento de Energia, Phase-Change Material (PCM), Método das Linhas.

1. INTRODUÇÃO

Aneke e Wang (2016) definem o armazenamento de energia como a sua captura em determinado instante de tempo para utilização posterior, sendo que este processo é conhecido como carga e o processo de liberação para uso como descarga.

O armazenamento energético, quando o conteúdo associado ao calor latente é considerado, consiste em induzir a mudança de fase em um material PCM (Phase-Change Material), armazenando a energia durante o processo de fusão e liberando energia no processo de solidificação. Segundo Esen *et al.* (1998), a principal vantagem deste tipo de sistema é o armazenamento de grandes quantidades de energia em pequenos volumes. Isto é especialmente verdadeiro se as variações de temperatura forem de poucas dezenas de graus centígrados, como geralmente acontece em sistemas com coletores solares convencionais.

A energia solar é conhecida por suas características de intermitência e por isso o armazenamento térmico de energia proveniente do sol se torna uma alternativa viável para preencher a lacuna entre produção e consumo, aumentando a eficiência e a confiabilidade no uso deste recurso energético. Para isso, conhecer o tempo necessário para a fusão completa do PCM é essencial.

O objetivo deste trabalho é elaborar uma metodologia computacional para analisar numericamente a fusão de CCHH (Cloreto de Cálcio Hexahidratado) sob a ótica da transferência de calor em regime transiente, avaliando dessa forma o comportamento diurno transiente do tanque.

1.1 Breve descrição do sistema

O tanque cilíndrico de armazenamento térmico faz parte de um sistema de aquecimento residencial, que utiliza a água aquecida pelo coletor solar, durante o dia, para realizar a fusão do PCM e consequentemente armazenar energia térmica empregando o calor latente. Durante a noite, o PCM é solidificado, cedendo calor para a água que será direcionada para a bomba de calor utilizada no aquecimento do ambiente.

O tanque de armazenamento é composto por tubos cilíndricos dispostos na direção vertical. O PCM está localizado dentro dos cilindros e a água escoa paralelamente a eles, em uma região considerada como um envelope do cilindro. É apresentada na Fig. 1 a geometria do tanque de armazenamento térmico proposto no trabalho.

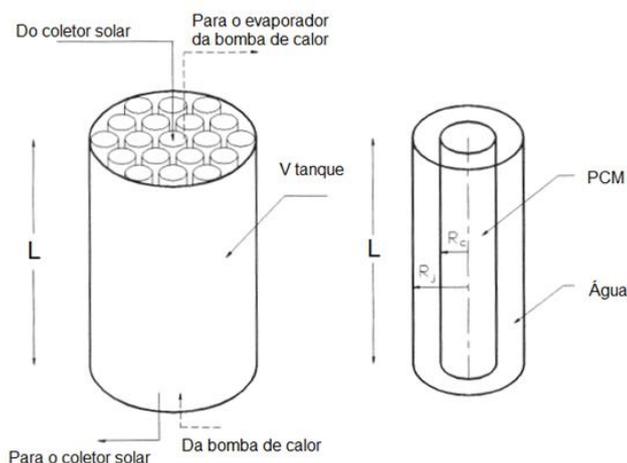


Figura 1 – Tanque de armazenamento e sub-unidade cilíndrica – Adaptado de Esen *et al.* (1998)

2. METODOLOGIA

Esen *et al.* (1998) elaboraram um modelo matemático, com solução temporal via abordagem implícita, que prevê a transferência de calor entre cinco materiais PCM e água para dois tipos de configurações de armazenamento. Além disso, realizaram análise paramétrica para verificar a influência de variáveis geométricas e térmicas no tempo de fusão completa do material, a fim de se obter uma configuração que minimizasse o mesmo. Inspirando-se nisso, o presente trabalho adota a configuração descrita na Fig. 1 e deseja obter o comportamento dinâmico do CCHH no processo de fusão, utilizando um tratamento algébrico-diferencial das equações e integração usando um pacote computacional comercial.

Foi simulado um tanque de armazenamento térmico de volume (V_{tanque}), área interna (A) e altura (L) de 4,25 m³, 13 m² e 3,2 m, respectivamente. O raio de cada cilindro de CCHH (R_c) é de 20 mm e o volume (V_{pcm}) contido no tanque é de 0,637 m³. A água vinda coletor solar possui temperatura (T_{ent}) de 50°C e vazão ($m_{\acute{a}gua}$) de 1100 kg/h. Foram adotadas as seguintes considerações para o desenvolvimento da metodologia: elaboração de uma malha bidimensional uniforme (direções radial e axial), a temperatura inicial (T_0) do CCHH e da água é de 18°C, todo o volume do tanque é preenchido por água e CCHH, o CCHH é um meio isotrópico, a espessura da parede do cilindro foi desconsiderada, as propriedades termofísicas do CCHH variam conforme a fase que o material se encontra e o comportamento de todos os cilindros de CCHH é considerado o mesmo. São apresentadas na Tab. 1 e na Tab. 2 as propriedades do CCHH e da água, respectivamente.

Tabela 1 – Propriedades Termofísicas do CCHH – Esen *et al.* (1998)

Propriedade	Valor
Densidade (ρ)	1710 kg/m ³
Calor Específico do Sólido (Cp_s)	1460 J/kg.K
Calor Específico do Líquido (Cp_l)	2130 J/kg.K
Condutividade Térmica do Sólido (k_s)	1,088 W/m.K
Condutividade Térmica do Líquido (k_l)	0,539 W/m.K
Condutividade Térmica da Transição (k_t)	0,7 W/m.K
Temperatura Inferior de Fusão (T_{f1})	29,7°C
Temperatura Superior de Fusão (T_{f2})	29,85°C
Calor Latente de Fusão (l_f)	187,49 kJ/kg

Tabela 2 – Propriedades Termofísicas da Água - Esen *et al.* (1998)

Propriedade	VALOR
Densidade ($\rho_{\acute{a}gua}$)	1000 kg/m ³
Calor Específico ($Cp_{\acute{a}gua}$)	4200 J/kg.K
Condutividade Térmica ($k_{\acute{a}gua}$)	0,606 W/m.K
Viscosidade Dinâmica (μ)	0,000653 kg/m.s

2.1 Método da Entalpia

O emprego de coordenadas cilíndricas simplifica a modelagem do processo simulado neste trabalho, sendo a equação geral da transferência de calor por condução em coordenadas cilíndricas em regime transiente apresentada na Eq. (1) (Incropera *et al.*, 2008).

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(kR \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(k \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Para o sistema em estudo há simetria radial, ou seja, não há variação das propriedades com o ângulo ϕ na Eq. (1), de modo que o processo possa ser simulado considerando-se somente 2 variáveis (as direções radial, r , e axial, z). Mais além, não há geração de energia de modo que o termo é nulo.

O armazenamento térmico empregando calor latente envolve processos de fusão e solidificação de materiais. Conforme Esen e Kutluay (2004), a interface que separa as regiões sólida e líquida tem sua posição desconhecida e parte da solução do problema consiste em determiná-la, resultando em problemas não-lineares e soluções analíticas difíceis de se obter. Seria necessário trabalhar com Eq. (1) para cada faixa de temperatura e respectiva fase do material.

Wu *et al.* (2017) consideram o método da entalpia matematicamente e computacionalmente mais fácil de ser implementado em comparação com outros métodos. Isso ocorre devido ao fato de não ser necessária a resolução de equações adicionais nem adequação da malha à mudança da interface.

O método da entalpia consiste na adaptação da Eq. (1) em termos da propriedade termodinâmica entalpia específica (i). Após esta modificação, e considerando-se a ausência de geração interna e a simetria radial, a equação que modela o sistema em estudo é apresentada na Eq. (2).

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(kR \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(k \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = \rho \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2)$$

Esen *et al.* (1998) apresenta funções que relacionam entalpia específica e temperatura (considerando 0°C como temperatura de referência), definindo um intervalo de mudança de fase, conforme apresentado nas Eq. (3), Eq. (4) e Eq. (5), onde i é a entalpia específica em kJ/kg.

$$i(T) = C_{p_s} \cdot T \text{ para } T \leq T_{f1} \quad (3)$$

$$i(T) = C_{p_l} \cdot T + \frac{l_f \cdot (T - T_{f1})}{\Delta T_f} \text{ para } T_{f1} \leq T \leq T_{f2} \quad (4)$$

$$i(T) = C_{p_l} \cdot T + l_f \text{ para } T > T_{f2} \quad (5)$$

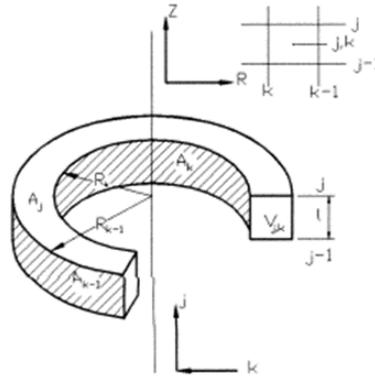
Contudo, verifica-se que há uma descontinuidade nos valores de entalpia ao se empregar as Eqs. (4 – 5) (isto pode ser observado comparando-se o valor da entalpia para T_{f1} fornecido pela Eq. (3) e pela Eq. (4)). Portanto, as funções de entalpia (considerando 0°C como temperatura de referência) foram corrigidas no presente trabalho de modo que esta propriedade seja uma função contínua em toda a faixa de temperatura utilizada, conforme apresentado nas Eqs. (6 – 7), substituindo as equações propostas por Esen *et al.* (1998).

$$i(T) = C_{p_s} \cdot T_{f1} + C_{p_l} \cdot T + \frac{l_f \cdot (T - T_{f1})}{\Delta T_f} \text{ para } T_{f1} \leq T \leq T_{f2} \quad (6)$$

$$i(T) = C_{p_s} \cdot T_{f1} + C_{p_l} \cdot (T - T_{f1}) + l_f \text{ para } T > T_{f2} \quad (7)$$

2.2 Discretização do Espaço por Volumes Finitos

Adotando uma porção de PCM como volume de controle cilíndrico finito, apresentado na Fig. 2, aplica-se um balanço de energia. Considerando uma malha bidimensional e uniforme, a variação temporal da entalpia no volume de controle é a diferença entre a taxa de transferência de calor nas entradas e nas saídas de cada face, exibido na Eq. (8).

Figura 2 – Volume de Controle Finito - Esen *et al.* (1998)

$$\rho \cdot V_{(j,k)} \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \Big|_{j,k} = -k \cdot A_k \cdot \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{j,k} + k \cdot A_{k-1} \cdot \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{j,k-1} - k \cdot A_{j-1} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{j-1,k} + k \cdot A_j \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{j,k} \quad (8)$$

$V_{(j,k)}$ é o volume do anel cilíndrico, A_k é a área da face k , A_{k-1} área da face $k-1$, A_{j-1} área da face $j-1$ e A_j área da face j . Pode-se mostrar que a Eq. (8) também pode ser obtida integrando-se a Eq. (2) nas direções radial e axial entre os limites do volume de controle.

Esen *et al.* (1998) sugere a aproximação das derivadas espaciais por diferenças finitas centrais nas faces dos volumes de controle descritas pelas Eqs. (9 – 12).

$$\frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{j,k} = 2 \frac{T_{j,k} - T_{j,k+1}}{R_{k-1} - R_{k+1}} \quad (9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{j,k-1} = 2 \frac{T_{j,k} - T_{j,k-1}}{R_k - R_{k-2}} \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{j,k} = \frac{T_{j+1,k} - T_{j,k}}{\Delta z} \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{j-1,k} = \frac{T_{j,k} - T_{j-1,k}}{\Delta z} \quad (12)$$

Substituindo as Eqs. (9-12) na Eq. (8) e manipulando algebricamente, obtemos uma equação geral (Eq. (13)) para volumes internos ($j=2$ a $nZ-1$ e $k=2$ a $nR-1$, sendo nZ e nR os números de divisões empregadas nas direções axial e radial) da malha.

$$\frac{\partial i}{\partial t} \Big|_{j,k} = \frac{k}{\rho} \cdot \left[\frac{-4R_k}{|R_{k-1}^2 - R_k^2|(R_{k-1} - R_{k+1})} \cdot (T_{j,k} - T_{j,k+1}) + \frac{4R_{k-1}}{|R_{k-1}^2 - R_k^2|(R_k - R_{k-2})} \cdot (T_{j,k} - T_{j,k-1}) - \frac{(T_{j,k} - T_{j-1,k})}{\Delta z} + \frac{(T_{j+1,k} - T_{j,k})}{\Delta z} \right] \quad (13)$$

Para os volumes de controle cujas faces entram em contato com a água é adotada condição de contorno convectiva (Eq. (14)), sendo a temperatura da parede de CCHH (T_p) apresentada na Eq. (15), calculada por diferenças finitas para trás.

$$-k \frac{\partial T}{\partial R} = h(T_p - T_{\text{água}}) \quad (14)$$

$$T_{p,j} = \frac{T_{j,1} + \left(\frac{h(R_c - R_k)}{2k}\right) T_{\text{água},j}}{1 + \left(\frac{h(R_c - R_k)}{2k}\right)} \quad (15)$$

onde h representa o coeficiente convectivo entre CCHH e água em $W/m^2 \cdot K$ e $T_{\text{água}}$ a temperatura da água vinda do coletor solar. No centro do cilindro ($k=nR$), foi adotada a condição de contorno de simetria radial (Eq. (16)). E nos volumes de

controle cuja interface é intersecção com o topo ($j=nZ$) ou a base do cilindro ($j=1$), foram adotadas condições de contorno de topo isolado (Eq. (17)) e base isolada (Eq. (18)), considerando-se que o topo e a base não estão em contato com a água.

$$\frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{j,nR} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{nZ,k} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{1,k} = 0 \quad (18)$$

2.3 Transferência de calor entre a água e o PCM

O diâmetro hidráulico (D_h) e o número de Reynolds (Re) do escoamento são dados por Esen *et al.* (1998), onde N é o número de cilindros de CCHH dentro do tanque:

$$D_h = \left(\frac{2V_{tanque}}{\pi \cdot N \cdot Rc \cdot L} \right) - 2Rc \quad (19)$$

$$Re = \frac{2 \cdot m_{\acute{a}gua}}{\pi \cdot N \cdot Rc \cdot \mu} \quad (20)$$

Rohsenow *et al.* (1985) estabelece uma correlação para cálculo do adimensional Nusselt para $Re \leq 2200$ (Eq. (21)) e para $Re > 2000$ (Eq. (22)). O número de Prandtl (Pr) pode ser calculado pela Eq. (23).

$$Nu = 3,66 + 4,12 \left[\left(\frac{D_h}{Rc} \right) - 0,205 \right]^{0,569} \quad (21)$$

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3} (1,08 - 0,794 e^{-1,62 \frac{D_h}{Rc}}) \quad (22)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot Cp_{\acute{a}gua}}{k_{\acute{a}gua}} \quad (23)$$

Valendo-se da definição do número de Nusselt (Eq. (24)), pode se calcular o coeficiente de transferência de calor entre a água e o PCM.

$$Nu = \frac{h \cdot D_h}{k_{\acute{a}gua}} \quad (24)$$

2.4 Método das Linhas

O sistema de equações algébrico diferenciais resultante da discretização da equação do calor em termos da entalpia é integrado no tempo com o integrador ode15i do MATLAB. As tolerâncias de integração foram definidas como 10^{-6} para a tolerância absoluta e 10^{-8} para a tolerância relativa. O passo no tempo é ajustado neste integrador para garantir erros inferiores às tolerâncias estabelecidas, sendo o tempo de integração definido como 10 horas, com as variáveis de saída registradas a cada 0,1h.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para análise do tempo de fusão completa do CCHH toma-se como referência a região mais fria do cilindro, localizada na intersecção do centro com a base do cilindro. É apresentado na Fig. 3 o perfil de temperaturas do CCHH neste ponto mais frio em função do tempo para diferentes números de divisões na direção radial e axial (para facilitar a análise de convergência empregou-se igual número de divisões em ambas as direções, ou seja, $nR=nZ$). É importante observar que para 17 e 18 divisões em cada direção, o material apresentou o mesmo tempo de fusão completa e as curvas praticamente se sobrepõem.

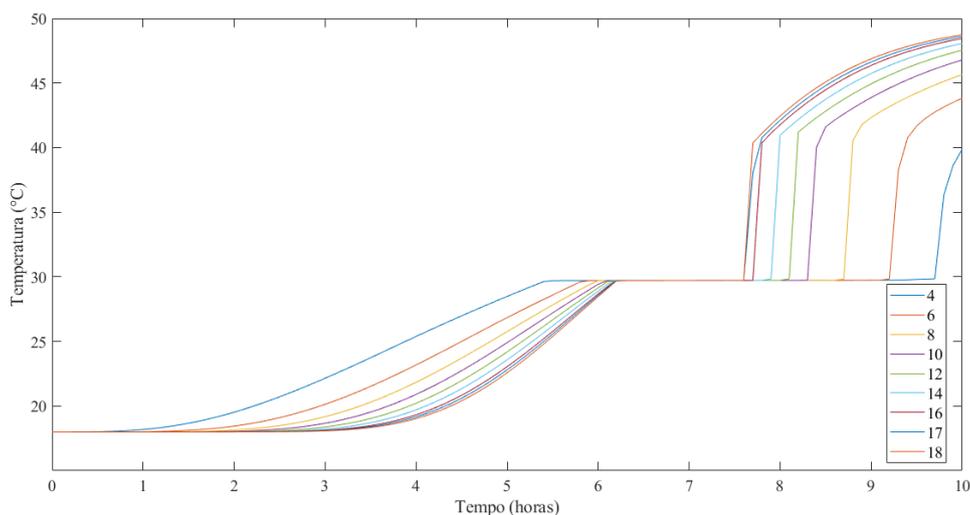


Figura 3 – Perfis temporais de temperatura para diferentes números de divisões nas direções radial e axial na intersecção com o centro e a base do cilindro (região mais fria)

Observa-se uma diferença no resultado de aproximadamente 2 horas ao se adotar 4 ou 17 divisões em cada direção, por isso a importância de se obter uma malha convergida para poder prever de maneira representativa o tempo de fusão completa do material. Verifica-se também que quanto menos convergida a malha, maior o tempo necessário para a fusão completa do PCM (mesmo que o início da fusão no ponto mais frio seja menor para a malha mais grosseira). A curva caracteriza corretamente o processo apresentando um platô na temperatura de fusão do material, período no qual ocorre a mudança de fase.

São apresentados na Fig. 4 os perfis radiais de temperatura da região próxima à base do cilindro nos tempos próximos à fusão completa do CCHH, utilizando uma malha com 17 divisões na direção radial e axial (malha convergida). Nota-se que para tempos superiores a 7,7h, o material se fundiu completamente. Como esperado, tem-se um perfil crescente de temperaturas do centro do cilindro para a extremidade em contato com a água, apresentando um comportamento fisicamente consistente.

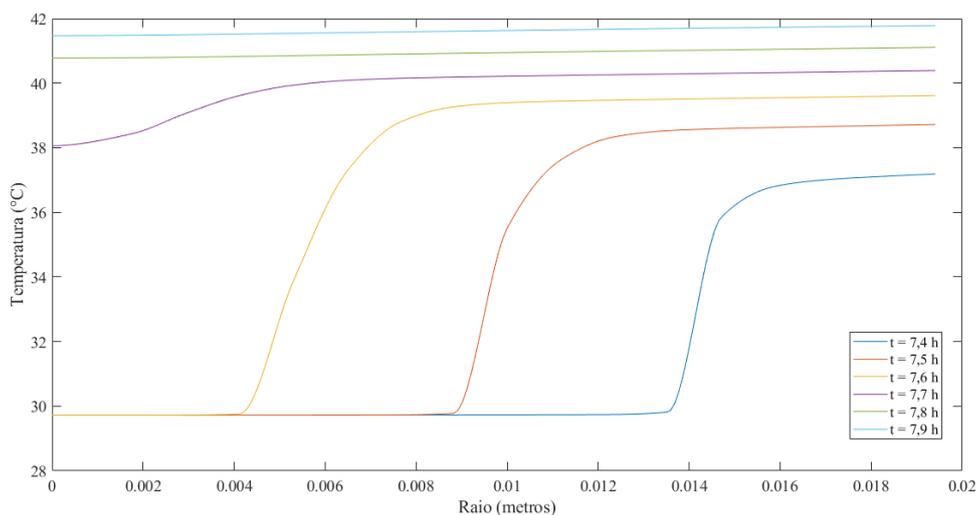


Figura 4 – Perfis radiais de temperatura na intersecção com a base do cilindro (região mais fria) para tempos próximos à fusão

Esen *et al.* (1998) obtiveram um tempo de aproximadamente 8,3h e optaram pelo uso do método de Euler implícito na integração do sistema de equações algébrico diferenciais resultante da discretização da Eq. 2. Estes autores reportam que as equações algébricas, obtidas em cada passo da integração, foram resolvidas pelo método iterativo de Gauss-Seidel, sendo que esta estratégia se aplica a sistemas lineares. Observa-se que esta estratégia só foi possível pelo uso de propriedades termofísicas constantes. Esta limitação não existe na estratégia proposta no presente trabalho, já a integração direta de sistemas equações algébrico diferenciais não se limita a equações lineares.

Ressalta-se também que em Esen *et al.* (1998) não são apresentados os critérios de convergência da malha não-uniforme proposta, nem maiores informações a respeito do intervalo de tempo utilizado na integração temporal. Portanto, não é possível estabelecer uma comparação exata entre o valor encontrado no presente trabalho e o valor obtido pelos autores do artigo. Os tempos de fusão, calculados no presente trabalho, para as malhas mais grosseiras é apresentado na Tab. 3.

Tabela 3 - Tempo de fusão completa do CCHH para diferentes malhas

Número de divisões em cada direção	Tempo de fusão completa (horas)
4	9,8
6	9,3
8	8,8
10	8,4
12	8,2
14	7,9
16	7,8
17	7,7
18	7,7

Verifica-se na Tab. 3 que quanto mais grosseira a malha, maior o tempo de fusão obtido. Este fato indica que é provável que a solução apresentada por Esen *et al.* (1998) não esteja convergida (no tempo ou no espaço) porque o tempo de fusão apresentado era cerca de 8% superior ao obtido para as malhas mais refinadas e se aproxima do tempo obtido para $nR=nZ=10$.

Na interseção com o topo do cilindro a mudança de fase ocorre em um menor intervalo de tempo. Tal fato é explicado pela entrada da água vinda dos coletores solares acontecer do topo para a base do cilindro. Os perfis axiais de temperatura no centro do cilindro para diferentes instantes de tempo são apresentados na Fig. 5.

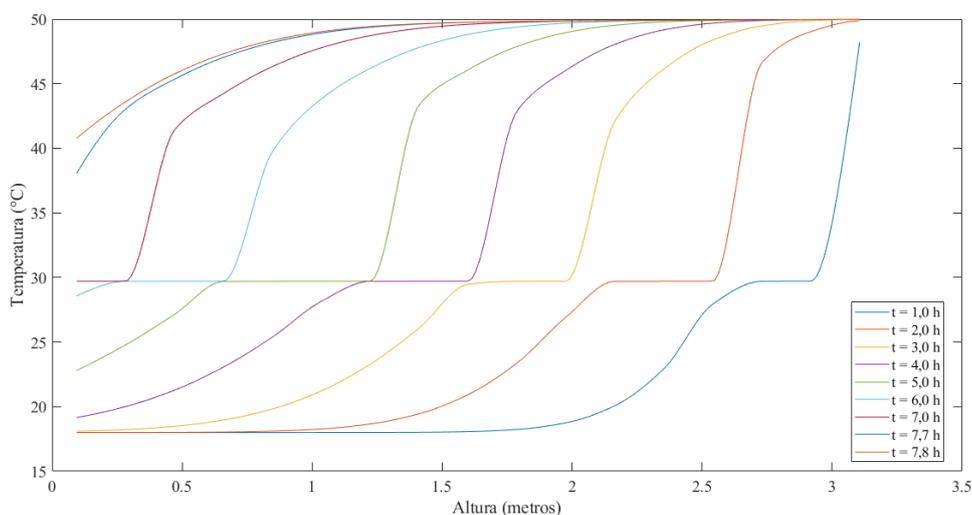


Figura 5 - Perfis axiais de temperatura no centro do cilindro ($r=0$) para diferentes instantes de tempo

Observa-se nesta Fig. 5 que em apenas 1 hora de funcionamento do sistema, a região localizada entre aproximadamente 3 – 3,5 metros de altura já está completamente líquida, já que o centro do cilindro é o último ponto de uma dada altura a sofrer fusão.

É apresentado na Fig. 6 o perfil tridimensional de temperaturas após 5 horas de funcionamento do sistema. No topo da superfície é representada a região de entrada de água vinda do coletor solar e na parte mais baixa a base do cilindro.

O tempo gasto para a fusão aumenta à medida que a região esteja mais afastada do ponto de alimentação da água vinda do coletor solar. Observa-se na Fig. 5 e na Fig. 6 que para até 5 horas de funcionamento do sistema, a região mais próxima à base do cilindro ainda apresenta temperaturas muito próximas à temperatura inicial, evidenciando que a troca de calor é mais acentuada nas regiões mais próximas ao topo no tempo considerado.

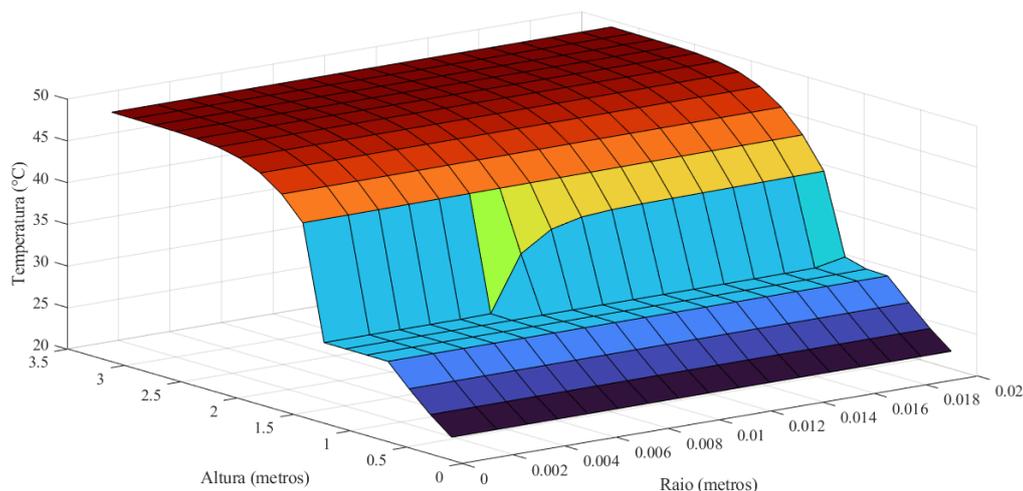


Figura 6 - Perfil tridimensional de temperaturas após 5 horas de funcionamento do sistema

Pode-se observar na Fig. 6 à exceção da região onde ocorre a fusão, a variação de temperatura entre o centro e a superfície do cilindro (direção radial) é bem inferior à variação de temperatura entre o topo e a base do cilindro (direção axial). Isto se deve ao fato de a dimensão radial ser muito inferior à axial para o sistema modelado. Entretanto, na região onde ocorre a fusão, a variação de temperatura na direção radial não pode ser desprezada, o que justifica o emprego de um modelo bidimensional para a descrição deste processo. Pode-se mostrar também que esta frente de fusão vai se deslocando do topo para a base do cilindro com o tempo.

4. CONCLUSÃO

Um estudo do comportamento diurno transiente do tanque de armazenamento térmico foi realizado empregando-se o método da entalpia, que permite a resolução de um problema em que ocorre a fusão de um material em meio estagnado. A solução numérica das equações diferenciais parciais acopladas às equações de entalpia foi realizada pelo método das linhas, sendo as dimensões espaciais (radial e axial) discretizadas em volumes finitos e o sistema de equações algébrico-diferenciais integrado no tempo. Em relação ao trabalho da literatura que motivou este estudo, foram modificadas as equações que descrevem a entalpia em função da temperatura e a estratégia de integração temporal utilizada, podendo explicar a diferença encontrada no resultado. O tempo para fusão completa do CCHH foi estimado, para as condições arbitradas, sendo de 7,7 horas. Enquanto Esen *et al.* (1998) encontraram 8,3 horas para as mesmas condições.

O método da entalpia, com as equações adaptadas no estudo, se mostrou eficaz na solução do problema de mudança de fase sem a identificação e tratamento da interface entre as regiões sólida e líquida e sem apresentar descontinuidades. A utilização do integrador ode15i se mostrou vantajosa, possibilitando resolver em conjunto as equações auxiliares e o sistema de equações diferenciais sem a necessidade da manipulação das equações. Também, para uma simulação mais representativa do processo, poderiam ter sido introduzidas equações para o cômputo da condutividade térmica e do calor específico como funções da temperatura, o que não seria possível na estratégia numérica proposta por Esen *et al.* (1998).

Os dados e curvas encontradas para o comportamento dinâmico do CCHH durante a fusão são fisicamente consistentes.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Aneke, M., Wang, M., 2016. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied Energy*, vol. 179, p. 350–377.
- Esen, A., Kutluay, S., 2004. A numerical solution of the Stefan problem with a Neumann-type boundary condition by enthalpy method, *Applied Mathematics and Computation*, vol. 148, n. 2, p. 321–329.
- Esen, M., Durmus, A., Durmus, A., 1998. Geometric design of solar-aided latent heat store depending on various parameters and phase change materials, *Solar Energy*, vol. 62, n. 1, pp. 19–28.

- Incropera, F.P., Lavine, A.S., Bergman, T.L., DeWitt, D.P., 2007. Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley Sons.
- Rohsenow, W., Hartnett, J., Cho, Y., 1998. Handbook of Heat Transfer Fundamentals, McGraw-Hill.
- Wu, M., Liu, L., Ding, J., 2017. An enthalpy method based on fixed-grid for quasi-steady modeling of solidification/melting processes of pure materials. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 108, p. 1383–1392.

NUMERICAL DESCRIPTION OF MELTING PROCESS IN A THERMAL STORAGE TANK

Abstract. *A cylindrical energy storage tank, which is part of a heating system, is studied in this work. The use of a material that undergoes phase change in an energy storage tank allows the use of smaller tanks, since the latent heat of fusion is much higher than the sensible heat, for the temperature variations obtained with solar collectors. In order to predict the diurnal behavior of the tank, the period in which energy is continuously stored, a literature model based on the enthalpy method is used. With modifications in the numerical solution strategy in the literature, it is proposed a correction in the equation used for enthalpy in order to make it continuous and also the direct integration of the algebraic-differential equations system, resulting from the discretization of the model in the 2 spatial directions in finite volumes, in a MATLAB commercial integrator. The integration routine used allows error control, which is more difficult to be performed using the Implicit Euler method used in the literature. Furthermore, in this new methodology, it is no longer necessary to use constant properties (specific heats and thermal conductivities). The simulated system uses CCHH (Calcium Chloride Hexahydrate) in the storage tank and water as the heat transfer fluid. The simulated time of complete fusion was used for the mesh convergence analysis and the solution with 17 divisions was considered converged in both radial and axial directions. The difference of about 10% in the fusion time compared to that obtained in the literature may be associated with the use of a 1st order method for temporal integration by the authors. The temporal, radial and axial profiles of temperature in the tank are presented and all were found to be physically coherent.*

Key words: *Energy Storage, Phase-Change Material (PCM), Method of Lines*