

CONVECÇÃO NATURAL EM TANQUES CILÍNDRICOS VERTICAIS ANÁLISE NUMÉRICA COM MODELOS UNIDIMENSIONAIS E BIDIMENSIONAIS

Rejane De Césaró Oliveski – decesar@mecanica.ufrgs.br

Arno Krenzinger – arno@mecanica.ufrgs.br

Horácio A. Vielmo – vielmoh@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica
CP 17819 – 90035-972 – Porto Alegre, RS, Brasil

***Resumo.** Este trabalho apresenta resultados de temperatura de um tanque cilíndrico vertical em regime de convecção natural, submetido à condição de perdas térmicas para o ambiente pela parede lateral, topo e base. A simulação numérica é feita com 3 versões do modelo de Múltiplos Nós (unidimensional) e com um modelo bidimensional que utiliza as equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia, discretizadas através do método dos volumes finitos. Com todos os modelos numéricos é simulado o resfriamento de um tanque com 40 configurações diferentes, variadas entre 4 razões de aspecto, 5 espessuras de isolamento e 2 volumes. Com respeito ao modelo de Múltiplos Nós, são descritos 2 artifícios computacionais implementados neste para que se obtenha perfis estratificados de temperatura. São apresentadas comparações entre os modelos de Múltiplos Nós entre si, e também entre estes e o modelo bidimensional.*

***Palavras-chave:** reservatórios térmicos, simulação numérica, múltiplos nós, volumes finitos*

1. INTRODUÇÃO

Os simuladores de sistemas de aquecimento de água por energia solar, tais como o TRNSYS, incorporam modelos unidimensionais para determinar a variação da temperatura no interior do reservatório ao longo do tempo. Nestes casos, o modelo mais utilizado é o chamado de Múltiplos Nós.

No modelo de Múltiplos Nós o reservatório é modelado com um número fixo de volumes. O domínio de cálculo ou volume de controle deste modelo envolve apenas o volume de água contida no reservatório. Este volume de controle é dividido em segmentos, que podem ser imaginados como discos sobrepostos, sendo que a temperatura dos discos é uniforme para cada um deles.

A utilização do modelo de Múltiplos Nós faz com que o grau de estratificação seja determinado pela escolha da quantidade de segmentos. Quanto maior o número de segmentos maior será o grau de estratificação (Klein et al., 1990). Com ele é possível se optar entre modelamento com posição de entrada fixa ou móvel. A posição de entrada refere-se ao nível do reservatório em que é adicionado o fluido de retorno dos coletores. Nos modelos de posição de entrada fixa, o fluido proveniente dos coletores é inserido no topo do reservatório e a água de reposição entra pela base do mesmo. Nos modelos de posição de entrada variável, o

fluido proveniente dos coletores é adicionado ao segmento que possui a massa específica mais próxima da massa específica do fluido que está entrando. A água proveniente dos coletores, quando entra numa camada de temperatura superior e massa específica inferior à sua, se desloca para baixo até encontrar uma camada de mesma massa específica. Portanto é fisicamente mais realista o modelamento com posição de entrada móvel. Análises de resultados com estes dois tipos de implementação podem ser encontrados em Duffie & Beckmann (1991), Kleinback et al. (1993) e Salvadoretti & Krenzinger (1995).

Como características favoráveis, estes modelos possuem a simplicidade do equacionamento e rápida obtenção de resultados. Em contrapartida, são incapazes de reproduzir resultados fisicamente coerentes quando a ação da gravidade for relevante.

Quando são usados no regime de convecção mista, na qual os coletores alimentam o reservatório com água quente pelo topo, eles são favorecidos pela condição de contorno térmica e hidrodinâmica desta condição e, com isso, fornecem um perfil estratificado de temperatura.

Durante a noite e em períodos sem sol o reservatório fica sujeito apenas à convecção natural e, neste caso, os modelos de Múltiplos Nós fornecem como resultados de temperatura perfis parabólicos, conforme mostrado na Fig. 1, pois não contam mais com a vantagem da convecção mista.

Com o objetivo de aproveitar as características de simplicidade de equacionamento e rápida obtenção de resultados, autores como Klein et al. (1990) e Franke (1997) simulam sistemas de aquecimento de líquidos utilizando o modelo anteriormente citado, mesmo na condição de convecção natural. Entretanto, neste caso são utilizados artifícios computacionais para corrigir a inconsistência física dos resultados iniciais (Fig. 1). Estes artifícios são comentados muito brevemente pelos pesquisadores, mas sempre na condição do sistema em operação, ou seja, numa condição de convecção mista para o reservatório. Na condição de convecção natural estes detalhes não são referidos, conseqüentemente há uma carência de resultados nesta condição.

O objetivo deste trabalho é verificar a margem de segurança que se tem ao utilizar os Múltiplos Nós para determinar o perfil de temperatura em reservatórios térmicos quando em regime de convecção natural. Para tal, compara-se os resultados obtidos através deste modelo com os obtidos com um modelo bidimensional validado experimentalmente e submetido a análise de estabilidade de malha.

2. O MODELO DE MÚLTIPLOS NÓS EM REGIME DE CONVECÇÃO NATURAL

Durante a noite ou em períodos sem sol os circuitos de aquecimento e reposição ficam inoperantes. Nestes períodos apenas a convecção natural se faz presente no interior do reservatório. Sendo assim, o principal mecanismo responsável pela formação do perfil estratificado de temperatura no reservatório é empuxo, ocasionado pelos gradientes térmicos.

Na ausência de circulação externa, os modelos de Múltiplos Nós são incapazes de fornecer resultados de perfil de temperatura estratificado. Este fato é decorrente da ausência do termo de empuxo e dos termos convectivos desta formulação, a qual conta apenas com os termos indicados na Eq. 1.

$$M c_p \frac{dT}{dt} = k A_t \Delta z \frac{d^2 T}{dz^2} + UA(T - T_{amb}) \quad (1)$$

Nesta equação, M representa a massa, c_p o calor específico a pressão constante, T a temperatura, k a condutividade térmica, A a área lateral de cada segmento do reservatório. T_{amb} representa a temperatura ambiente, U o coeficiente global de troca térmica, Δz a distância entre o centro de um segmento e outro, A_t a área transversal do segmento e t o tempo.

O uso da Eq. 1 para simular o resfriamento de líquidos em reservatórios, implica em modelamentos ineficientes para este caso, pois o reservatório resfria como se este fosse um sólido, fazendo com que a troca térmica em seu interior seja apenas difusiva.

O coeficiente global de troca térmica por convecção é calculado através da equação 2.

$$U = \left(\frac{e}{k} + \frac{1}{h} \right)^{-1} \quad (2)$$

Onde “ e ” é a espessura e k a condutividade térmica do isolamento e h o coeficiente de troca térmica por convecção externa.

Considerando um resfriamento com temperatura inicial uniforme e perdas uniformes em todas as paredes, o fluxo de calor cedido ao meio ambiente pelo topo e pela base são iguais. Com isso a temperatura no topo e na base também são as mesmas. Este resultado contraria os princípios físicos da convecção natural, pois apresenta uma inversão de temperatura no topo, conforme pode ser visto na Fig. 1.

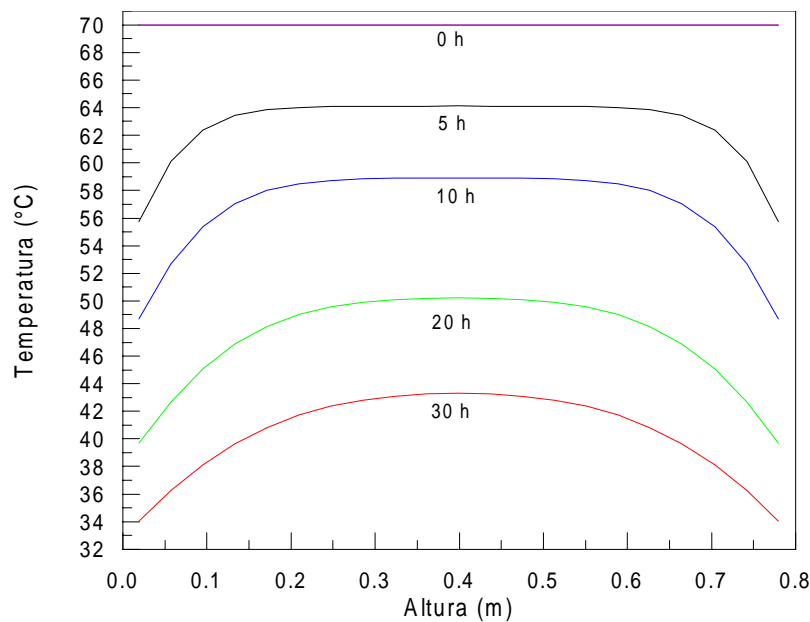


Figura 1 - Perfis de temperatura em função do tempo ao longo da altura

O problema da inversão de temperatura é corrigido por alguns autores (Franke, 1997, Klein et al., 1990, entre outros) através de artifícios computacionais. Estes artifícios são utilizados após a obtenção do perfil de temperatura em um intervalo de tempo.

2.1 Artifícios Computacionais

Franke (1997) resolveu o problema da inversão de temperatura no topo do reservatório através da troca de temperatura entre as camadas envolvidas na inversão. Ou seja, o autor segue a lógica de que a temperatura mais alta, em qualquer instante de tempo, deve estar no

topo do reservatório. Caso isto não ocorra, a troca de temperatura é efetuada através de uma simples instrução no programa. Neste trabalho, o artifício utilizado por Franke é chamado de “Múltiplos Nós com Inversão”.

Das duas versões apresentadas em Klein et al. (1990) o modelo Estratificado e o modelo Detalhado, apenas o modelo Detalhado estratifica em regime de convecção natural. O modelo Estratificado somente estratifica por ação da circulação externa. Em regime de convecção natural (sem circulação externa), o perfil de temperatura obtido com este modelo é idêntico ao apresentado na Fig. 1.

O modelo Detalhado corrige a inversão térmica através do uso da temperatura média ponderada entre as camadas envolvidas na inversão. Para fazer isto os segmentos do reservatório são varridos em sentidos opostos. Em sentido ascendente é identificado o ponto de inflexão da curva. Neste segmento e no imediatamente superior é feita a média ponderada das temperaturas e esta média fica valendo para os dois. Se à medida em que a varredura vai avançando uma nova inversão é identificada então uma nova média é feita, sempre lembrando o segmento em que se encontrava a primeira inflexão. No final do processo, todos os segmentos acima do primeiro ponto de inflexão passam a ter a mesma temperatura. Desta forma o problema da inversão no topo é resolvido.

O fato de se utilizar a média em todos os segmentos acima do primeiro ponto de inflexão gera uma descontinuidade da curva. Este problema é resolvido na varredura descendente, a qual começa pelo topo do reservatório e vai até encontrar o segmento em que a temperatura é maior que a do segmento imediatamente superior. Neste ponto é tomada a média ponderada entre as temperaturas destes 2 segmentos envolvidos na descontinuidade. O ciclo é então refeito até que nenhuma inversão e descontinuidade exista na curva de temperatura ao longo da altura do reservatório. Este procedimento é chamado neste trabalho de “Múltiplos Nós com Média”.

3. ABORDAGEM NUMÉRICA BIDIMENSIONAL

As equações da conservação da massa, quantidade de movimento e energia são discretizadas através do Método dos Volumes Finitos, conforme descrito por Patankar (1980). O acoplamento entre as equações da quantidade de movimento e energia é feito através da variação do campo de massa específica no tempo e no espaço em função da temperatura. O esquema Power Law é utilizado para interpolação na faces dos volumes de controle. O acoplamento pressão velocidade é obtido através do método SIMPLEC. Os Sistemas de equações resultantes são resolvidos através do TDMA.

Como condições de contorno tem-se, para as equações da quantidade de movimento, impermeabilidade e não deslizamento em todas as paredes, com exceção da linha de simetria, que possui tensão de cisalhamento nula.

Para a equação na energia tem-se condição de contorno de terceira espécie na parede lateral, topo e base, ou seja, o reservatório é submetido a um resfriamento por ação da convecção externa. Para simular esta situação utilizou-se um coeficiente de troca de calor por convecção, nas faces externas do reservatório (lateral, topo e base), igual a $10 \text{ W/m}^2\text{C}$. A condição inicial é de campo de velocidades nulo e campo de temperatura uniforme.

Com estas condições simulou-se o resfriamento de um tanque cilíndrico vertical, conforme pode ser visto na Fig. 2, com 40 configurações diferentes, as quais são: 4 razões de aspecto ($H/D= 1,0, 1,5, 2,0$ e $2,5$), 5 espessuras de isolamento ($e= 1, 10, 20, 30$ e 40 mm) e 2 volumes ($v=0,1$ e $0,2 \text{ m}^3$).

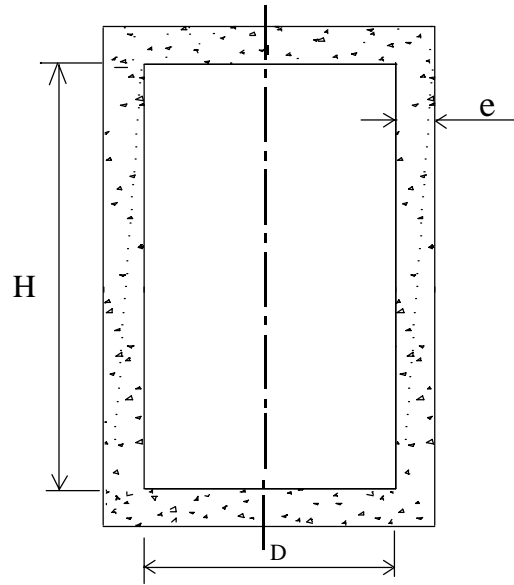


Figura 2 - Reservatório térmico

O uso da Eq.2 com as diferentes espessuras de isolamento resultaram em 5 diferentes coeficientes globais de perdas térmicas (U), os quais são: 1,0 , 1,3 , 1,8 , 2,9 e 8,0 $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$.

A dependência das malhas utilizadas foi investigada através do GCI (Grid Convergence Index) segundo Roache (1998), que forneceu resultados máximos de 3% entre os casos analisados.

O modelo numérico bidimensional foi validado experimentalmente com excelente concordância de resultados Esta validação pode ser encontrada em Oliveski et al. (1997).

4. RESULTADOS

Simulou-se todos os 40 casos citados no item anterior com o modelo bidimensional e com os modelos de Múltiplos Nós. Os resultados destas simulações foram objeto de comparação entre os modelos numéricos. Tendo em vista a grande quantidade de resultados e a homogeneidade destes em relação aos diferentes casos, apenas alguns deles são mostrados aqui.

Na Fig. 3 estão representados os perfis de temperatura ao longo da altura do reservatório, para um coeficiente parcial de perdas $U = 1,0 W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$, obtidos com o modelo de Múltiplos Nós com Média e Múltiplos Nós com Inversão. Observa-se nesta figura que o objetivo de impedir a inversão de temperatura, com o uso dos artifícios computacionais, foi alcançado, indicando uma total concordância entre os 2 modelos.

Se por um lado estes artifícios beneficiam o perfil de temperatura, por outro a energia acumulada fica prejudicada, pois as perdas térmicas aumentam. Para identificar este fato, a Fig. 4 apresenta resultados de temperatura média ao longo do tempo, obtidos através dos 2 artifícios computacionais implementados ao modelo de Múltiplos Nós, juntamente com o resultado referente ao modelo de Múltiplos Nós que gerou a Fig. 1.

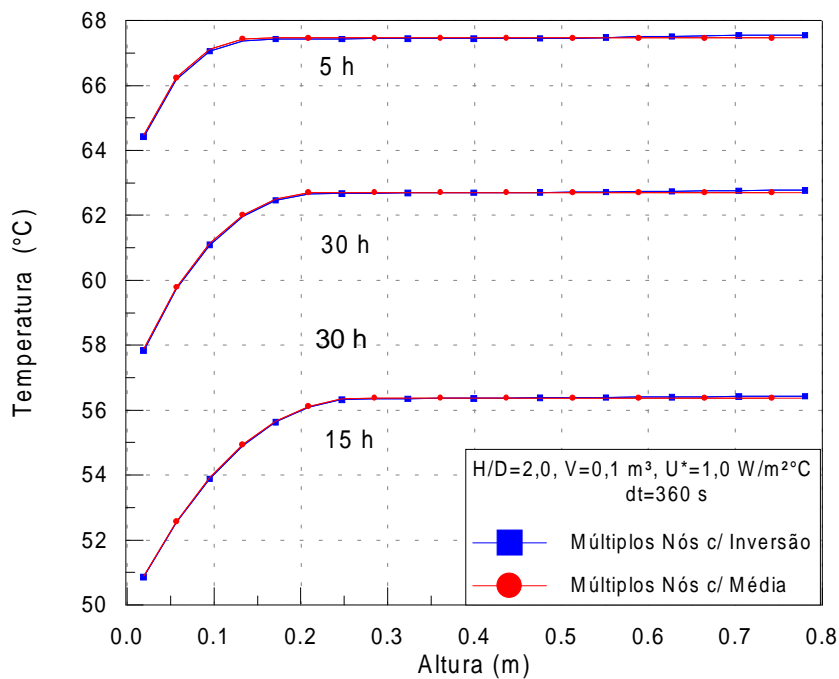


Figura 3 - $H/D=2,0$, $V=0,1 \text{ m}^3$, $U^*=1,0 \text{ W/m}^2\text{°C}$, $dt=360 \text{ s}$

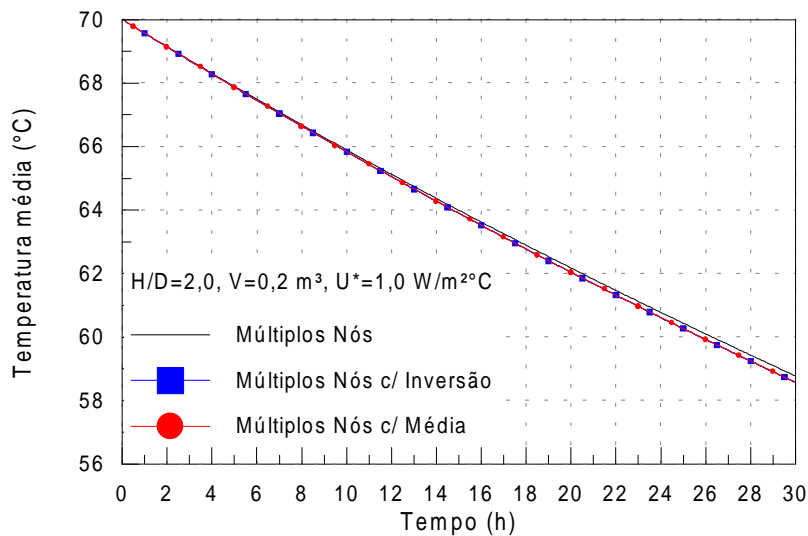


Figura 4 - $H/D=2,0$, $V=0,2 \text{ m}^3$, $U^*=1,0 \text{ W/m}^2\text{°C}$

Para os 2 casos (Fig. 3-4), a razão de aspecto é a mesma e igual 2,0 e o coeficiente global de perdas é $1,0 \text{ W/m}^2\text{°C}$. A Fig. 3 possui volume de $0,1 \text{ m}^3$, sendo que na Fig. 4 o volume é de $0,2 \text{ m}^3$.

Em todos os casos testados (40), os resultados de ambos artificiais computacionais apresentam temperatura média inferior à temperatura média obtida com o modelo de Múltiplos Nós. Além disso pode-se observar que estas diferenças vão aumentando com o tempo, independentemente do volume ou do coeficiente global de perdas.

Isto ocorre porque ao se calcular o resfriamento de um reservatório em regime de convecção natural, a partir do modelo de Múltiplos Nós sem artificiais computacionais, se

obtem um perfil de temperatura ao longo da altura com característica parabólica. Este perfil tem sua temperatura mais alta na metade do reservatório, conforme pode ser visto na Fig. 1. Desta forma, o fluxo máximo de calor por unidade de área ocorre justamente no ponto de máximo, local cuja troca de calor é devida apenas à parede lateral. Os segmentos localizados no topo e na base são os que mais rapidamente resfriam. Isto é devido à posição e quantidade de área envolvida na troca, pois estes segmentos, além de trocarem calor pelo topo e pela base, trocam também pela superfície lateral.

Incorporando-se ao modelo de Múltiplos Nós qualquer um dos 2 artifícios computacionais anteriormente descritos, o topo do reservatório deixa de ser um dos locais de menor fluxo de calor. Com isso a temperatura média do reservatório diminui. Este decréscimo de temperatura é cumulativo com o tempo, conforme pode ser observado na Fig. 4.

O intervalo de tempo admitido neste tipo de simulação é relativamente alto, comparando-se com os intervalos de tempo utilizados no modelo bidimensional, os quais variam entre 10 s e 0,1 s, dependendo das condições de contorno e regime de escoamento.

Os resultados apresentados anteriormente, com os 3 modelos de Múltiplos Nós, foram gerados com intervalo de tempo de 360 s. Abaixo deste valor, as diferenças encontradas entre uma solução e outra são insignificantes. Para intervalos de tempo superiores a 600 s as soluções começam a se afastar gradativamente com o aumento do intervalo de tempo.

As curvas da Fig. 5 representam o perfil de temperatura ao longo da altura, em 3 instantes de tempo (5, 15 e 30 h). As curvas desta figura são referentes ao modelo de Múltiplos Nós com Média, utilizando-se 2 intervalos de tempo: 360 s e 3600 s. Observa-se nesta figura, que nas primeiras horas de resfriamento, praticamente não existe diferença entre as soluções. À medida que o tempo passa as soluções vão se afastando, indicando que se deve utilizar intervalos de tempo inferiores a 3600 s, tendo em vista que a única diferença entre elas é o intervalo de tempo.

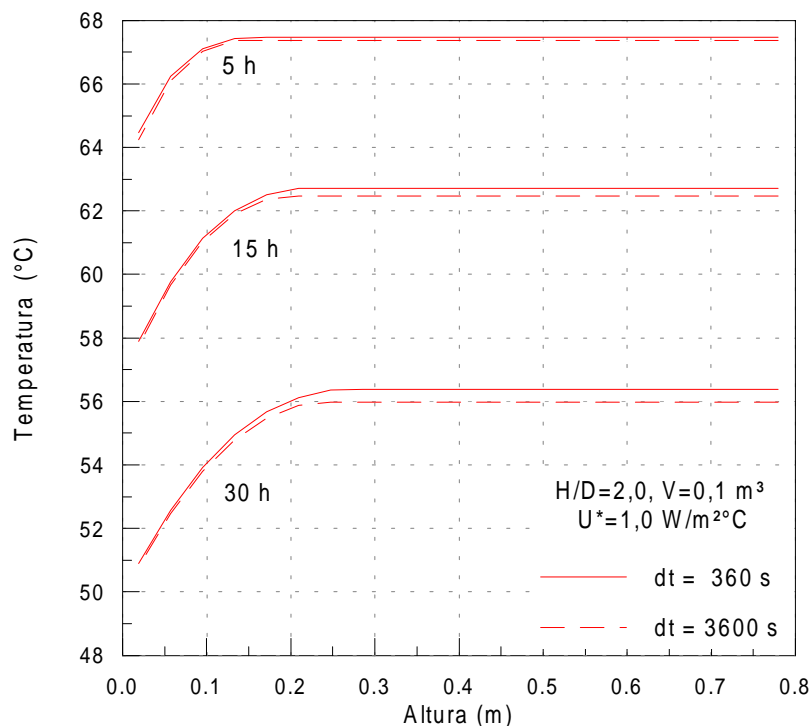


Figura 5 - $H/D=2,0$, $V=0,1$ m³, $U^*=1,0$ W/m²°C. Com $dt= 360$ s e 3600 s

Utilizando-se intervalos de tempo inferiores a 600 s, os resultados fornecidos pelos 2 artifícios computacionais são praticamente os mesmos. Acima deste valor, as soluções obtidas com o artifício da inversão de camadas ficam descaracterizadas. Este fato pode ser observado na Fig. 6, a qual apresenta o perfil de temperatura ao longo da altura, simulado com os 2 artifícios computacionais, utilizando-se um intervalo de tempo de 3600 s.

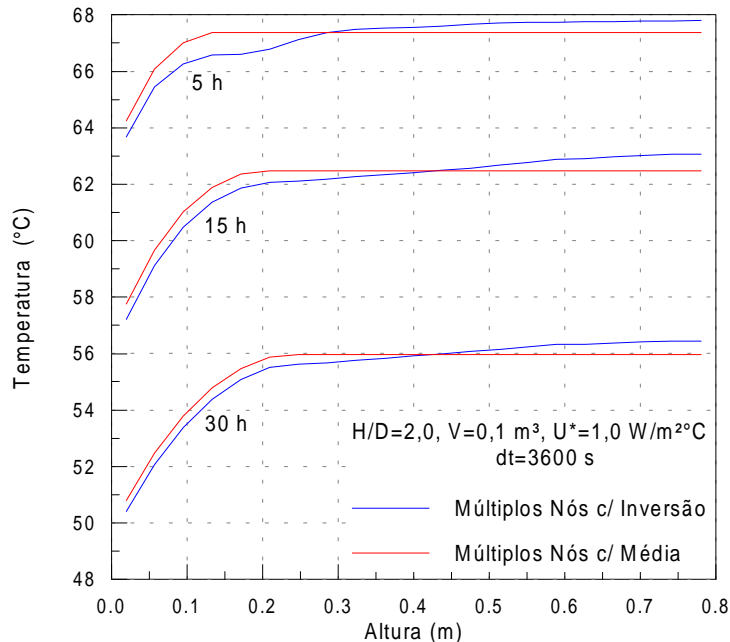


Figura 6 - $H/D=2,0$, $V=0,1 \text{ m}^3$, $U^*=1,0 \text{ W/m}^2\text{°C}$, $dt = 3600\text{s}$

Os desvios mais pronunciados são encontrados nas primeiras 5 h de resfriamento. No decorrer do processo (simulação) as soluções se aproximam, mas as curvas continuam cruzadas a meia altura do reservatório. Isto faz com o parâmetro de estratificação seja diferente se obtido através dos resultados do artifício da inversão ou se obtido através do outro artifício. Este fato só foi observado quando do uso de intervalos de tempo desta ordem (3600 s) ou maior.

A Fig. 7 mostra a temperatura média do reservatório obtida a partir de 3 versões do modelo de Múltiplos Nós (Múltiplos Nós original, Múltiplos Nós com Inversão de temperatura e Múltiplos Nós com Média) e o modelo bidimensional. Nesta figura pode-se observar que, em termos de energia acumulada, o modelo bidimensional é mais conservativo que os demais. Esta diferença ocorre porque o modelo de Múltiplos Nós não considera a resistência interna ao fluxo de calor, aumentando com isso o valor do coeficiente global de troca (U^*), resultando em valores de temperatura inferiores. A diferença observada na Fig. 7 não fica tão evidenciada quando o coeficiente global de troca é alto, pois nesta situação o transiente térmico é muito forte se aproximando assim de uma condição de resistência térmica interna nula.

A diferença de conservação de energia, entre os modelos anteriormente citados, também pode ser observada através dos resultados de temperatura ao longo da altura da Fig. 8. Nesta figura nota-se que, qualitativamente, os resultados entre o modelo bidimensional e os unidimensionais são muito semelhantes. Diante do que já foi comentado anteriormente, pode-se dizer que a diferença quantitativa encontrada entre as soluções é consequência da não inclusão de uma resistência interna no modelo de Múltiplos Nós, acrescida da implementação dos artifícios computacionais.

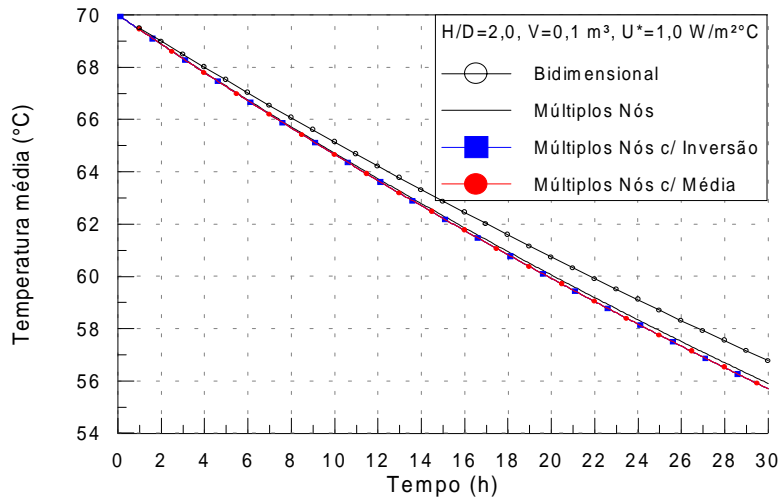


Figura 7 - Temperatura média. Múltiplos Nós x Bidimensionais.

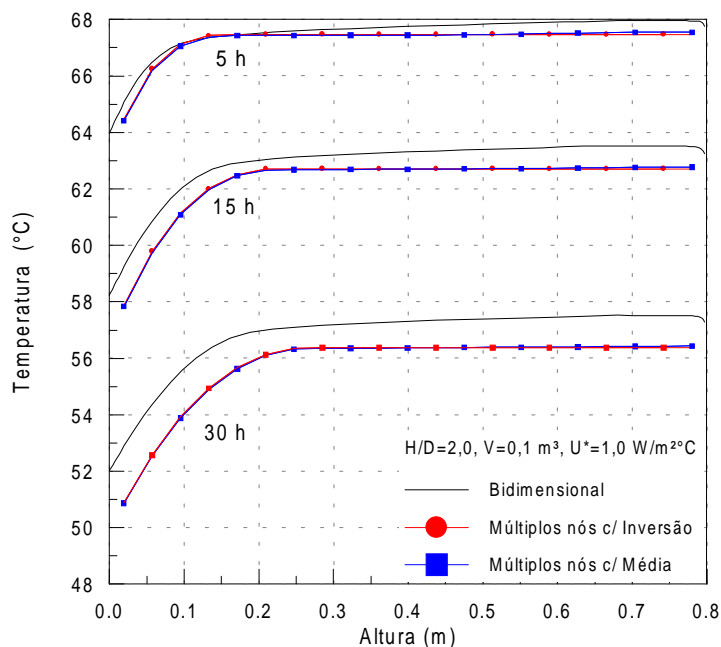


Figura 8 - Temperatura ao longo da altura. Múltiplos Nós x Bidimensional.

5. CONCLUSÕES

Três modelos de Múltiplos Nós foram testados: o tradicional e mais 2 com artifícios computacionais. As comparações foram feitas em relação à temperatura média do reservatório e ao perfil longitudinal de temperatura. Nestas duas situações, o modelo de Múltiplos Nós tradicional apresentou resultados de perfil de temperatura e temperatura média inferiores aos fornecidos pelo modelo bidimensional, fato este justificado pela ausência de resistência interna na formulação do modelo de Múltiplos Nós.

Em função do aumento da área de troca térmica, quando da implementação dos artifícios computacionais, os modelos de Múltiplos Nós com Média e Múltiplos Nós com Inversão reduzem a temperatura no interior do reservatório. Com isso se afastam ainda mais dos resultados obtidos com o modelo bidimensional.

Apesar de apresentar um resfriamento mais rápido os modelos de Múltiplos Nós, com os 2 artifícios computacionais testados, apresentam perfil de temperatura ao longo da altura qualitativamente compatíveis com aqueles fornecidos com o modelo bidimensional.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES e do CNPq.

REFERÊNCIAS

- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons.
- Franke, R., 1997, Object-Oriented Modeling of Solar Heating Systems, Solar Energy, vol. 60, pp. 171-180.
- Klein, S. A. et al., 1990, TRNSYS 13.1 User's Manual.
- Kleinbach, E.M., Beckman, W. A. and Klein, S. A., 1993, Performance Study of One-Dimensional Models for Stratified Thermal Storage Tanks, Solar Energy, vol. 2, pp. 155-166.
- Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill.
- Oliveski, R. C., Krenzinger, A., Vielmo, H. A. e Prieb, C. W. M., 1997, Análise Numérico - Experimental da Distribuição de Temperatura em um Reservatório de Água Quente, XIV COBEM - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, em CD-ROM, Bauru, Brasil.
- Roache, P. J., 1998, Verification and Validation in Computational Science and Engineering, Hermosa Publishers.
- Salvadoretti, J. L. e Krenzinger, A., 1995, Comparação entre Duas Abordagens para a Distribuição de Água Quente em Reservatório na Simulação de Sistemas Solares, XIII COBEM - Congresso Brasileiro de Eng. Mecânica, em CD-ROM, Belo Horizonte, Brasil.

NATURAL CONVECTION IN VERTICAL CYLINDRICAL TANKS : NUMERICAL ANALYSIS USING UNIDIMENSIONAL AND BIDIMENSIONAL MODELS

***Abstract:** This paper presents the results of temperature distribution in a vertical cylindrical tank, submitted to natural convection conditions due to thermal losses to the ambient by lateral wall, top and bottom. The numerical simulation is performed with 3 different versions of the Multiple Nodes model (unidimensional) and with a bidimensional model that uses the conservation of mass, momentum and energy equations, discretized by the Finite Volumes Method. The cooling of the water in the tank is simulated with every numerical model in 40 different configurations, using 4 aspect ratios, 5 insulation thickness and 2 volumes. Furthermore, 2 computational strategies created in the Multiple Nodes model aiming to obtain stratified temperature profiles are described here. Comparisons among the various Multiple Nodes models and between these and the bidimensional model are presented too.*

Keywords: thermal reservoirs, numerical simulation, multiple nodes, finite volumes.