

USO DE SOLUÇÕES NUMÉRICAS COMO FERRAMENTA DIDÁTICA NO ESTUDO DA DINÂMICA DE RESERVATÓRIOS TÉRMICOS

Darci Luiz Savicki - darcilus@mecanica.ufrgs.br

Arno Krenzinger - arno@mecanica.ufrgs.br

Horácio A. Viello - vielmoh@mecanica.ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa. de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

8.3 – Material Didático

Resumo. Neste trabalho apresenta-se um estudo do comportamento térmico e hidrodinâmico de reservatórios térmicos conectados a coletores solares via simulação numérica tridimensional. O código computacional utilizado resolve as equações do movimento e da energia na forma transiente real, o que possibilita descrever a evolução temporal dos campos de temperatura e velocidade no interior do reservatório. Para fins de simulação, foi considerado um reservatório térmico cilíndrico horizontal e estudadas situações típicas que ocorrem em sistemas de aquecimento de água via energia solar: 1) Ingresso de água quente pela parte superior e saída de água fria pelo fundo do reservatório. 2) Ingresso de água fria pela parte inferior do reservatório e saída de água quente pela parte superior. 3) Ingresso de água pela parte superior do reservatório numa temperatura inferior à existente no seu interior naquela altura. Cada caso resulta em um perfil de temperatura típico, cujo processo de formação pode ser acompanhado de forma transiente através de animações geradas a partir da solução numérica. Os problemas de difusão e advecção do calor aqui considerados aparecem com frequência em diversas disciplinas das áreas de energia solar e fenômenos de transporte, dentre outras. As animações geradas neste trabalho serão disponibilizadas em site na internet, para que professores e alunos possam utilizá-las como ferramenta didática no estudo de problemas advectivos-difusivos de transferência de calor.

Palavras-chave: Simulação numérica tridimensional, Transferência de calor, Mecânica dos fluidos, Energia solar.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os vários processos de aproveitamento da energia solar, os mais usados atualmente são o aquecimento de fluidos e a geração fotovoltaica de energia elétrica. No caso do aquecimento de fluidos, a radiação solar é utilizada diretamente como fonte de energia térmica. O aproveitamento da energia solar para o aquecimento de água é uma excelente alternativa para a economia de energia elétrica, visto que substitui o uso de chuveiros elétricos, que consomem em média 40% de toda a energia gasta numa residência. Essa tecnologia pode ser facilmente aplicada em residências, hotéis, motéis, hospitais, vestiários, restaurantes, industriais e no aquecimento de água para piscinas. Seu uso abrange desde a higiene pessoal e até a lavagem de utensílios e ambientes. Segundo dados da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRVA), em 2005 o uso da energia solar no Brasil para aquecer a água possibilitou a economia de mais de 380 MWh de energia elétrica, sendo usada em quase 600 mil domicílios.

Apesar disto, no Brasil, seu uso é ainda bastante restrito. Um dos principais entraves à difusão da tecnologia de aquecimento solar de água é o custo de aquisição dos equipamentos, particularmente para residências de baixa renda. Mas a tendência ao longo dos anos é a redução dos custos, em função da escala de produção, dos avanços tecnológicos, do aumento da concorrência e dos incentivos governamentais. Alguns fatores que têm contribuído para o crescimento do mercado são a divulgação dos benefícios do uso da energia solar, a isenção de impostos que o setor obteve,

os financiamentos aos interessados em implantar o sistema e a necessidade de reduzir os gastos com energia elétrica (ABRAVA, 2001).

O coletor solar é responsável pela absorção e transferência da energia solar para a água, sob a forma de energia térmica. O coletor é instalado normalmente no teto das residências e edificações, sendo que para o suprimento de água quente de uma residência típica (três ou quatro moradores), são necessários cerca de 4 m^2 de coletor.

O calor é transmitido para a água que circula nas tubulações dos coletores solares. O reservatório térmico é um recipiente para armazenamento da água aquecida. Geralmente são cilindros, feitos de cobre ou aço inoxidável e isolados termicamente. O isolamento permite que a água permaneça aquecida por um período de tempo prolongado. A caixa de água tem a função de repor o volume de água gasto quando ocorre consumo de água quente.

A montagem destes componentes é feita de forma que a circulação de água ocorra por convecção natural (termossifão), induzida pela diferença de densidade entre a água quente e fria. Para a grande maioria das substâncias, quando a temperatura diminui, a densidade aumenta. A água apresenta uma singularidade, visto que a densidade assume um valor máximo em aproximadamente 4°C . Assim, para temperaturas acima deste valor, pode-se dizer que um aumento da temperatura é acompanhado por uma redução da densidade. A água aquecida no coletor fica menos densa, deslocando-se para a parte superior do circuito (topo do reservatório térmico). A água mais fria (mais densa) desloca-se do fundo do reservatório para a parte mais baixa do circuito (à entrada do coletor). Percebe-se a partir do exposto que para o termossifão funcionar, o reservatório térmico deve ficar numa posição superior aos coletores solares.

2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMO FERRAMENTA DIDÁTICA – ESTUDO DE CASOS

O enfoque apresentado neste trabalho é o uso de soluções numéricas do comportamento térmico e hidrodinâmico de reservatórios térmicos conectados a coletores solares como ferramenta didática para a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos em problemas de advecção e difusão de calor, dentre os quais o estudo de sistemas de aquecimento de água por energia solar é um caso particular.

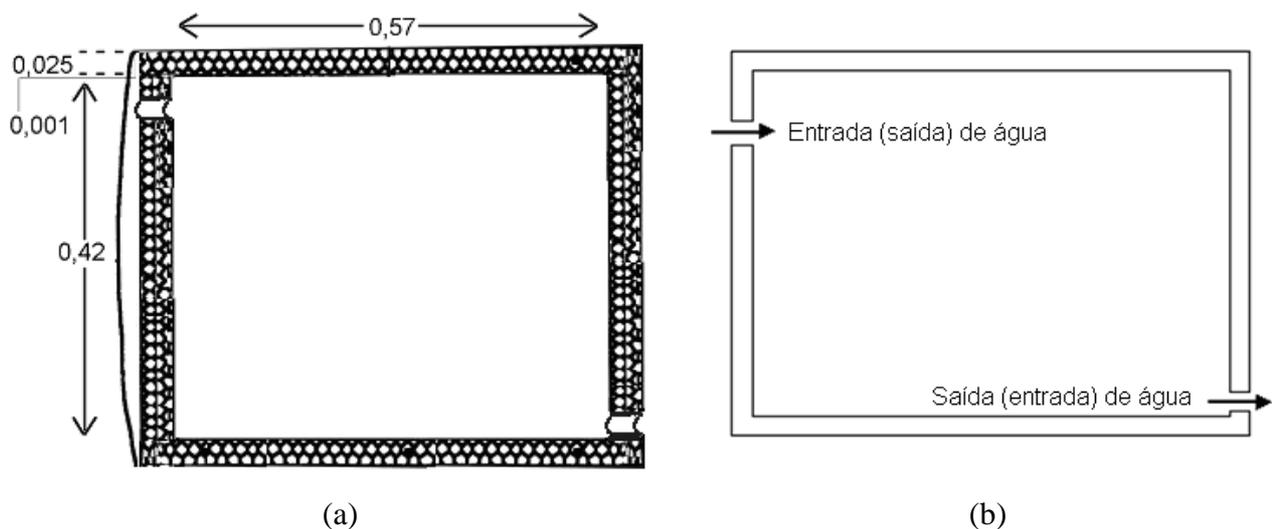


Figura 1 (a) Dimensões do reservatório simulado, medidas em [m].
(b) Esquema destacando as posições de entrada e saída de água.

A Fig. 1 (a) apresenta a geometria e as dimensões do reservatório que é objeto de estudo nas simulações que serão apresentadas e na Fig. 1 (b) mostra em destaque as posições de entrada e saída de água. Dependendo do caso estudado, as alturas dos pontos de entrada e saída são variadas, bem como uma posição de entrada de água pode ser transformada numa posição de saída e vice-versa. Considera-se que as camadas da parede metálica interna e de isolamento tem valores iguais nas

direções radial e axial, sendo respectivamente 0,001m e 0,025m. A parede metálica interna é de cobre e o isolamento de poliuretano. Na posição de entrada de fluido aplica-se condição de contorno de Dirichlet e na saída condição de Neumann. Maiores detalhes, tais como o modelo matemático, com as condições de contorno, e as técnicas de simulação numérica empregadas podem ser vistas em Savicki et al. (2005).

2.1. Ingresso de água com temperatura variável em um campo uniformemente estratificado

Nesta simulação foi colocado como condição inicial no interior do reservatório um campo de temperatura com distribuição linear na faixa de 40°C (na base) a 50°C (no topo) e foi feito ingressar água com temperatura variando linearmente de 50°C a 40°C ao longo do tempo de 1 minuto. Esta distribuição de temperatura, embora difícil de ocorrer numa situação prática, é bastante útil para ilustrar o movimento da água em direção às camadas de igual temperatura. A entrada e saída têm diâmetro de 20mm. A posição da entrada situa-se a 2/3 do diâmetro e a saída situa-se no fundo do reservatório. A taxa de vazão é de 0,4 litros por minuto.

A Fig. 2 apresenta o perfil do campo de temperatura no plano vertical passando pelo diâmetro, para instantes correspondentes a temperatura de ingresso diferente. Na mesma figura mostra-se ainda as componentes de velocidade V_r (componente radial) e V_z (componente axial) do campo de velocidade.

Na Fig. 2(a), a temperatura de ingresso é 50°C e observa-se que a temperatura da água na vizinhança da entrada é inferior a este valor. Assim, por estar numa temperatura superior, apresenta densidade menor e desloca-se para cima até atingir uma camada de igual temperatura e densidade. A figura mostra ainda que neste movimento ascendente, a água quente que ingressou, ao atravessar as diversas camadas de água menos quente, sofre uma mistura e vai diminuindo seu valor original, de modo que ao chegar ao topo do reservatório já não está mais a 50°C. Na Fig. 2(b), observa-se que a temperatura da água de ingresso é de aproximadamente 49°C e assim ela não se desloca mais até o topo de reservatório (que está a 50°C), mas sim até uma altura compatível com a densidade, ou seja, até uma altura onde a água está a 49°C. Na Fig. 2(b) observa-se ainda que neste movimento ascendente, a água ao atingir uma camada de igual temperatura, não para imediatamente, mas sim a ultrapassa para depois retornar a altura de igual temperatura. Este fato, bem como o processo de mistura ao longo do movimento de subida, é indesejável nos sistemas onde a circulação da água ocorre por termossifão, visto que destrói a estratificação do campo de temperatura. Na Fig. 2(c), a temperatura da água de ingresso é de aproximadamente 45°C e observa-se que água agora apresenta um movimento descendente, visto que no reservatório, a camada de água a 45°C encontra-se numa posição inferior à entrada. Finalmente, na Fig. 2(d), a temperatura da água ingressada é de 40°C e observa-se que o movimento de descida é ainda mais acentuado. Observa-se ainda, que a água, mesmo ingressando a 40°C, não se desloca até o fundo do reservatório, que também está a 40°C. Conforme dito acima, isto se deve ao processo de mistura que ocorre no deslocamento da água de ingresso com a água das diversas camadas atravessadas.

A análise destas figuras, obtidas por simulação numérica, permite ampliar o entendimento do comportamento térmico e hidrodinâmico no interior do reservatório. Uma visão melhorada pode ainda ser feita através da animação de diversas figuras, reproduzindo o movimento transiente no interior do reservatório.

2.2 Ingresso de água em uma posição a 2/3 do diâmetro com temperatura variável em um campo homogêneo

Neste caso, novamente a temperatura de ingresso foi feita variar linearmente na faixa de 50°C à 40°C ao longo de 1 minuto. A diferença neste caso é que o campo de temperatura inicial é homogêneo, de valor 45°C. A entrada e saída tem diâmetro de 20mm. A taxa de vazão novamente é de 0,4 litros por minuto. Para simplificar a análise, mostra-se aqui apenas os dois extremos da

simulação: quando a temperatura de ingresso é superior ao campo interior e quando a temperatura de ingresso é inferior ao campo de temperatura interior.

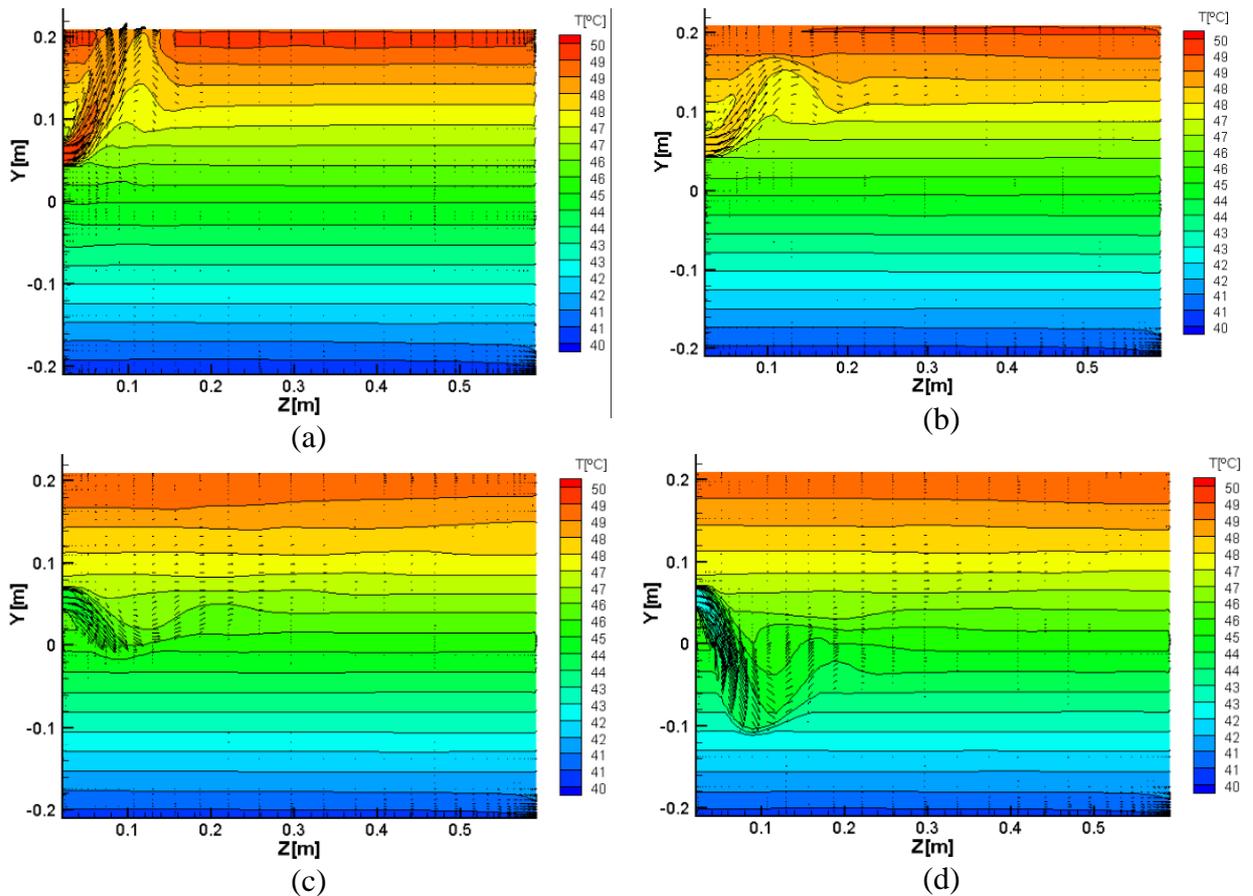


Figura 2. – Vista do campo de temperatura e velocidade para instantes com temperatura de ingresso variáveis num campo de temperatura linearmente estratificado.

Na Fig. 3(a), observa-se que a água de ingresso a 50°C, ao ingressar no reservatório, imediatamente desloca-se para a parte superior do mesmo. Neste momento, mesmo misturando-se com a água mais fria do interior do reservatório, a temperatura da mistura é sempre superior à temperatura do campo inicial, de modo que a água da mistura sobe até o topo do reservatório.

Já na Fig. 3(b), observa-se que a água de ingresso, após um minuto, é de 40°C. O campo de temperatura agora está levemente alterado, em decorrência do ingresso de água no decorrer do minuto anterior, conforme se observa pelas linhas isotermas. Ao contrário da figura anterior, agora água de ingresso se aquece ao misturar-se com a água presente reservatório. Mesmo assim, a temperatura da mistura fica inferior ao da temperatura pré-existente no interior do reservatório, de modo que esta água misturada desloca-se até o fundo do reservatório.

Na Fig. 4, mostram-se os mesmos extremos da simulação apresentados na Fig. 3 porém agora nos planos radial e angular, passando pelo meio do reservatório.

Observa-se claramente que nos primeiros instantes, com o ingresso de água em uma temperatura superior ao valor pré-existente no interior do reservatório, começa a formar-se na região superior do reservatório uma camada de água mais quente e estratificada, em decorrência do sucessivo processo de mistura da água mais quente de ingresso com a água mais fria do interior do reservatório. Pode-se verificar através da escala que o valor da temperatura máxima desta camada estratificada é de aproximadamente 46,4°C, que é inferior ao valor da temperatura máxima de ingresso, que foi de 50°C.

Por outro lado, na Fig. 4(b), que corresponde ao tempo de 1 minuto após o ingresso de água, e num momento onde a temperatura de ingresso é de aproximadamente 40°C, observa-se a formação de uma camada de temperatura mais baixa no fundo do reservatório. A região intermediária entre o

topo e a base do reservatório está numa temperatura praticamente uniforme, próxima do valor inicial de 45°C.

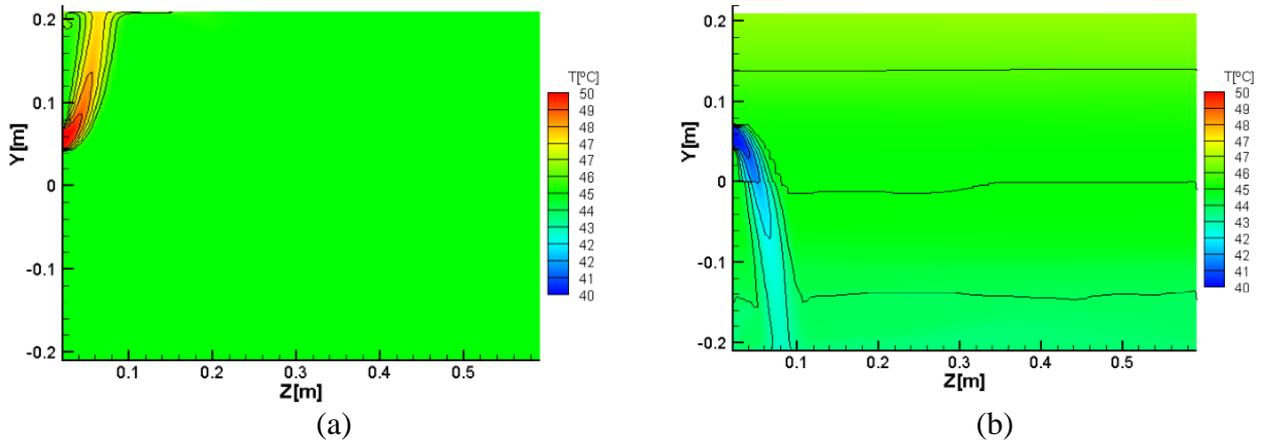


Figura 3 – Vista do campo de temperatura no plano radial-axial.
 (a) temperatura de ingresso igual a 50°C. (b) temperatura de ingresso igual a 40°C.

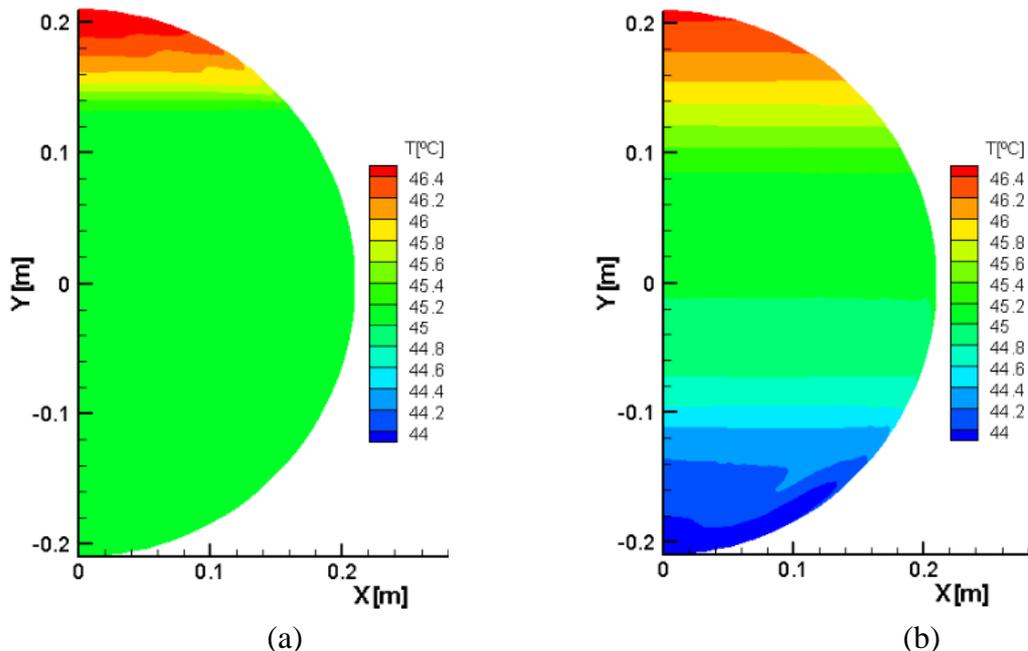


Figura 4 - Vista do campo de temperatura no plano radial-angular.
 (a) temperatura de ingresso igual a 50°C. (b) temperatura de ingresso igual a 40°C.

2.3 Ingresso de água em uma posição a 2/3 do diâmetro com temperatura constante em um campo homogêneo

Este caso se assemelha ao anterior, com a diferença que a temperatura de ingresso da água é mantida constante ao longo de uma hora. Considera-se um campo inicial de temperatura de 22,5°C e, a partir da entrada localizada a 2/3 do diâmetro, ingressa-se água quente para o interior do reservatório numa temperatura de 26,5°C, ou seja, a temperatura de ingresso é 4 graus acima da temperatura do campo inicial. A taxa de vazão é de 0,4 litros por minuto e o tempo simulado é de 1 hora, que corresponde ao ingresso de um volume de 24 litros.

Na Fig. 5, de (a) a (d), mostram-se o campo de temperatura para alguns instantes de tempo tomados no intervalo de 1 hora. A Fig. 5 (a) corresponde a um minuto logo após o início do

ingresso de água quente. As Fig. 5 (b), 5(c) e 5(d) correspondem respectivamente a tempos de 20min, 40min e 60 min após o início. Observa-se que ocorre uma significativa mistura entre a água de ingresso e a água pré-existente no interior do reservatório, de tal modo que, até chegar no topo do reservatório, a temperatura da água aproximadamente 2 graus a menos do que a temperatura de ingresso. Mesmo após uma hora, a água que ingressa continua se misturando a água no interior do reservatório e chega ao topo do reservatório numa temperatura inferior a de ingresso.

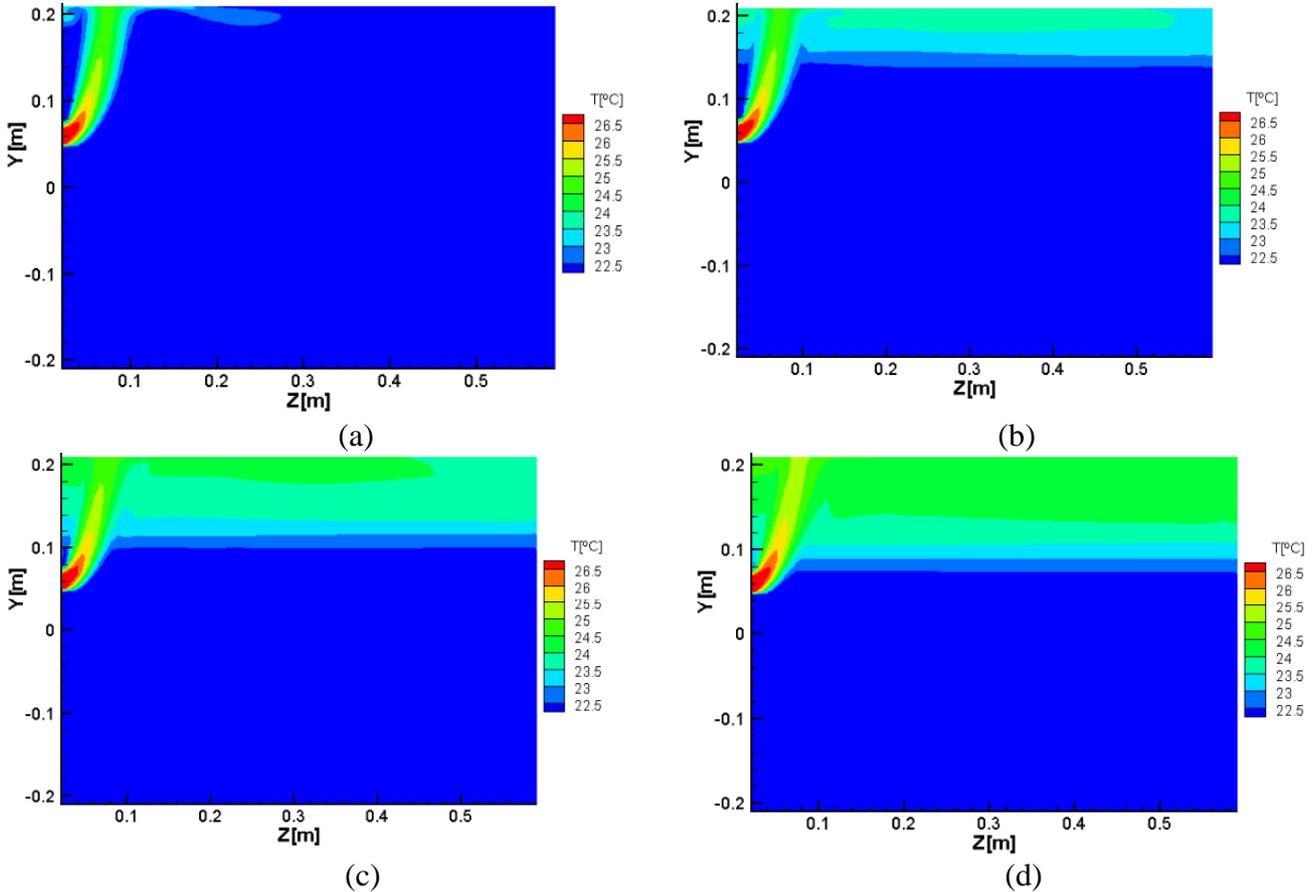


Figura 5 –Campos de temperatura em 4 instantes de tempo tomados no intervalo de 1 hora de simulação.

Uma visualização mais ilustrativa deste fenômeno de advecção da água quente no interior do reservatório pode ser dada através da visualização tridimensional do campo de temperatura, como os mostrados na Fig. 6, de (a) a (d).

Através da visualização em iso-superfícies, observa-se novamente a significativa mistura da água mais quente de ingresso com a água mais fria do interior do reservatório. Observa-se ainda que a distribuição da temperatura ocorre em planos horizontais, observando-se apenas variações das iso-superfícies em posições próximas do jato de entrada.

2.4 Ingresso de água pelo topo com temperatura constante em um campo homogêneo

Nesta situação foi considerado o reservatório preenchido com água a 22,5°C e ingressada água pela parte superior numa temperatura constante de 27°C. A taxa de vazão é a mesma dos casos anteriores, ou seja, 0,4 litros por minuto e o tempo simulado é de 60 minutos.

Nas Fig. 7(a) e Fig.7(b), mostram-se os campos de temperatura e velocidade nos planos radial-axial e radial-angular, respectivamente, para um instante de tempo de 2 minutos após o ingresso de água quente pela parte superior do reservatório. Em ambas as figuras observa-se que a água ingressa numa temperatura superior a partir do topo do reservatório, permanece nessa posição e sofre pouca mistura com a água interior, formando um abrupto degrau térmico. Observa-se ainda, nas duas

figuras, a formação da camada limite hidrodinâmica. Um aspecto particularmente interessante é a formação da recirculação mostrada no plano radial-angular, que é descrito na literatura como “escoamento pistonado”.

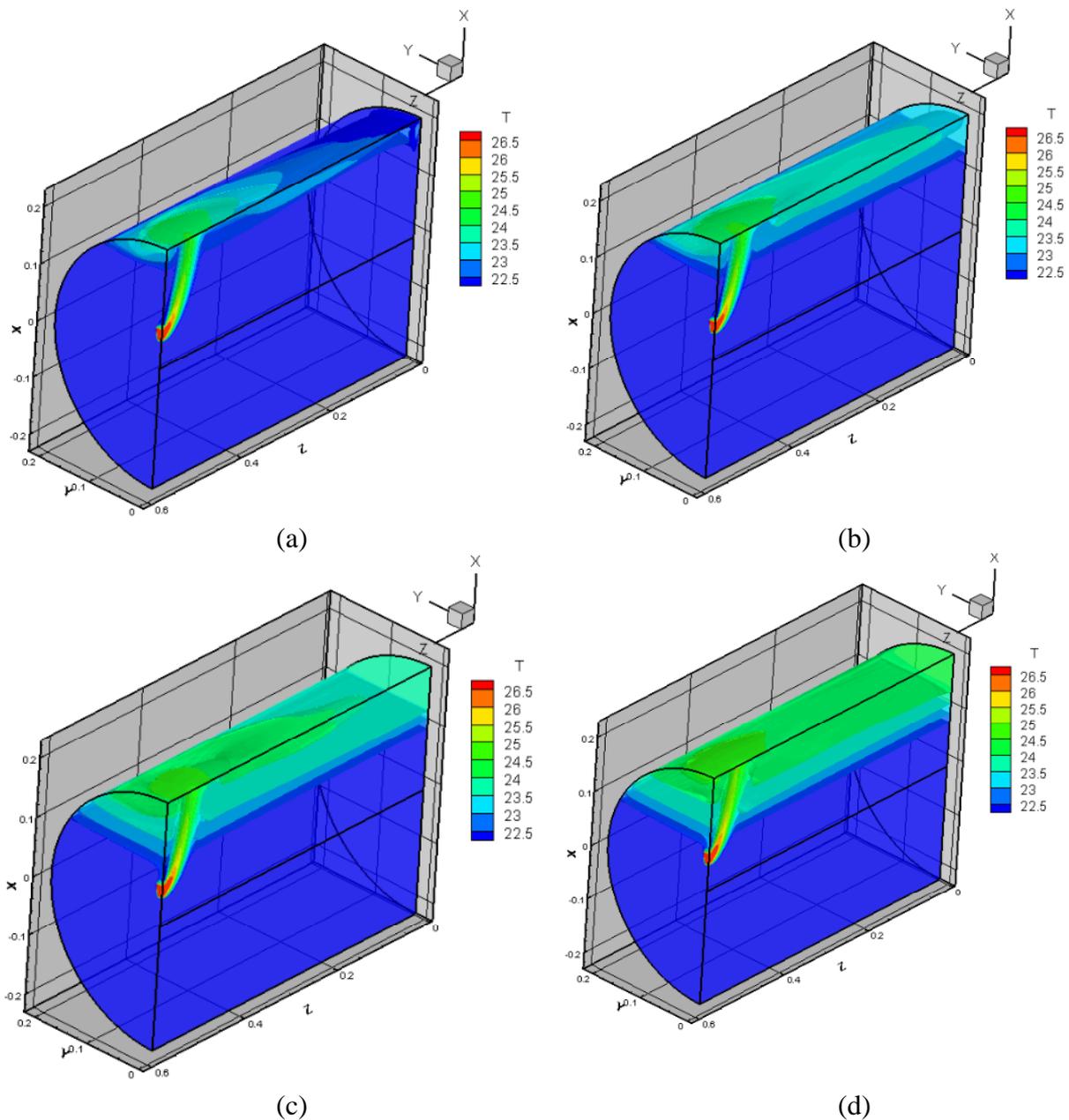


Figura 6 - Campos de temperatura tridimensional em 4 instantes de tempo tomados no intervalo de 1 hora de simulação.

As Fig. 7(c) e Fig. 7(d) mostram os campos de temperatura e velocidade nos planos radial-axial e radial-angular, respectivamente, 60 minutos após o início do ingresso de água quente pela parte superior. Neste instante, o volume de água ingressado numa temperatura de 27°C é de 24 litros e observa-se que todo este volume ocupa a região superior do reservatório. A camada limite hidrodinâmica no plano radial-axial neste momento é mais espessa que nos instantes iniciais, enquanto que a camada limite hidrodinâmica no plano radial-angular fica restrita principalmente a região que ainda não sofreu alteração da temperatura.

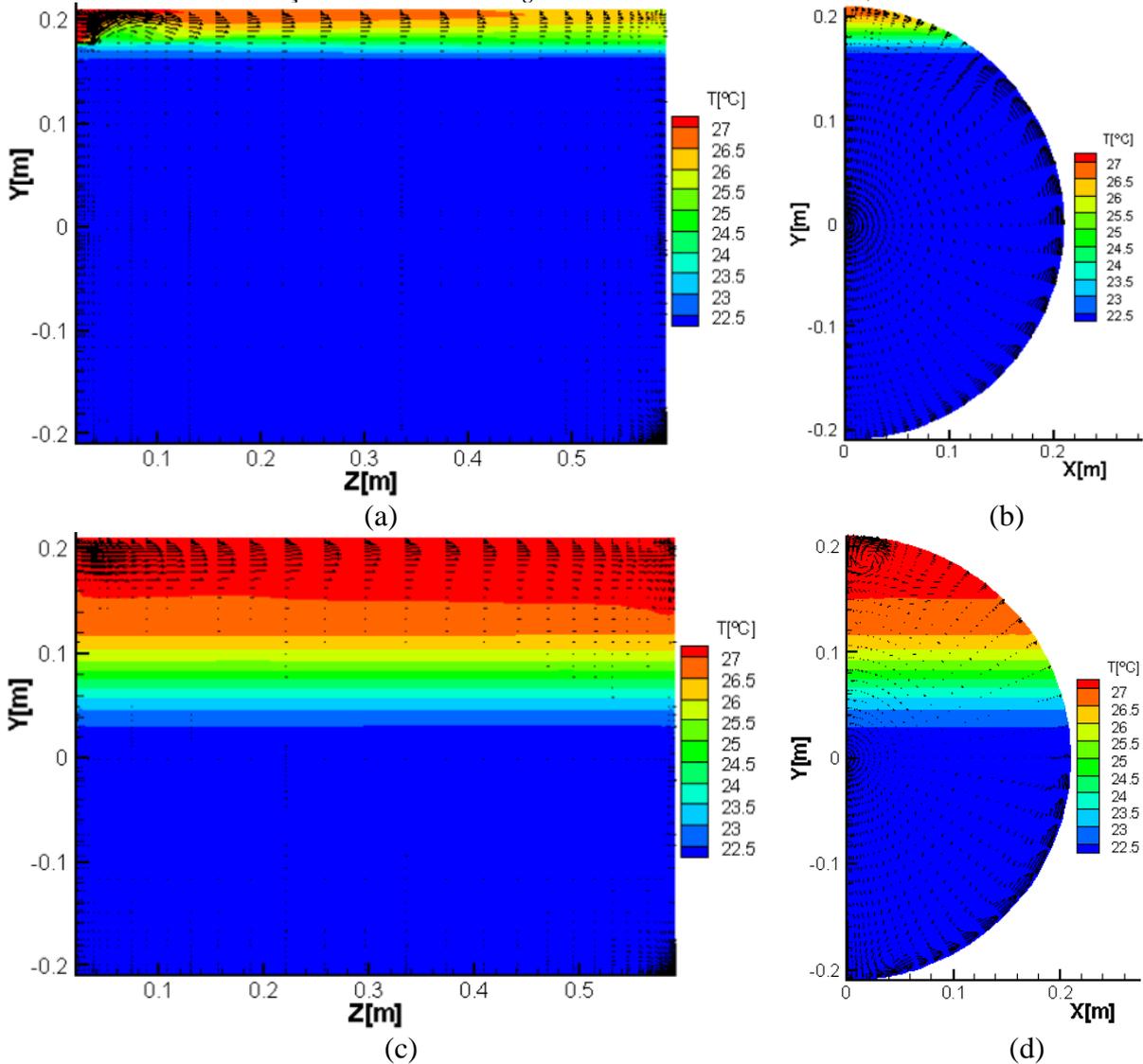


Figura 7 – Campos de temperatura e velocidade para os instantes 2 minutos e 60 minutos de simulação do caso de ingresso de água quente num campo de água inicial homogêneo de temperatura inferior.

2.5 Consumo de água quente pelo topo do reservatório e ingresso de água fria pela base

Para o caso de consumo de água quente pelo topo do reservatório e ingresso de água fria pela base, os pontos de entrada e saída da água mostrados na Fig. 1(b) são invertidos. O caso aqui apresentado reproduz um experimento onde foi ingressado um volume de 15 litros de água numa temperatura de 22°C no interior do reservatório cuja água se encontrava numa temperatura constante de 50°C. A taxa de vazão foi de 1,36 litros por minuto mantida constante durante um período de tempo de 11 minutos.

A Fig. 8 (a) mostra o campo de temperatura imediatamente após o início do consumo e a Fig. 8 (b) mostra o campo de temperatura após o consumo de 15 litros de água quente pelo topo do reservatório com conseqüente ingresso de igual volume de água fria pela base do reservatório. Observa-se a formação de um abrupto degrau térmico, o que mostra que a água que ingressa mistura-se muito pouco com a água quente pré-existente no interior do reservatório.

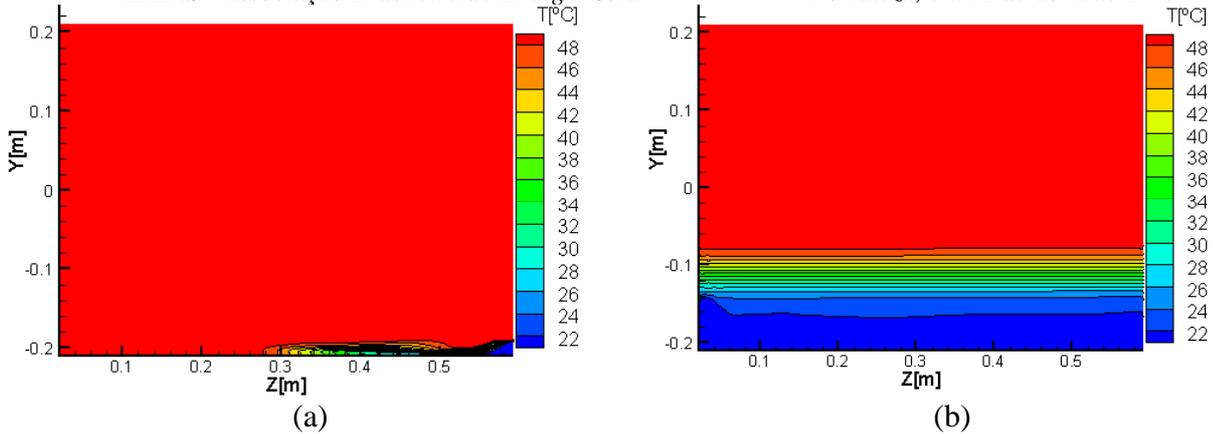


Figura 8 – (a) Campo de temperatura no plano radial-axial. (a) em instante imediatamente após o início do consumo. (b) após consumo de 15 litros de água quente com ingresso de igual volume de água fria.

As Fig.9(a) e 9(b) mostram os campos de temperatura e velocidade nos mesmos instantes mostrados na figura anterior, porém com vista no plano radial-angular, numa posição axial que divide o reservatório ao meio. Além do acúmulo de água fria na base do reservatório, a Figura b mostra que também neste caso surge o fenômeno do escoamento pistonado, identificado pela pronunciada formação da camada limite hidrodinâmica junto as paredes, principalmente na região onde a temperatura ainda não foi afetada pela água fria de ingresso.

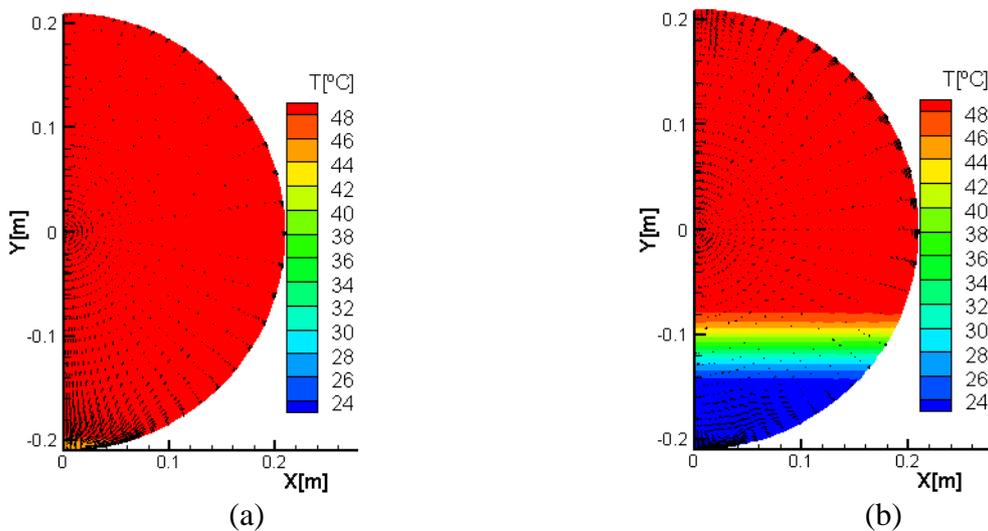


Figura 9- (a) Campo de temperatura no plano radial-angular. em instante imediatamente após o início do consumo. (b) após consumo de 15 litros de água quente com ingresso de igual volume de água fria.

Por fim, cabe salientar que as presentes simulações foram geradas em código computacional parcialmente desenvolvido pelos autores, que foi devidamente validado, conforme apresentado em Savicki et al (2005). Apenas como ilustração da validade das soluções numéricas aqui apresentadas, a Fig.10 mostra uma comparação entre o perfil numérico e os dados experimentais para a temperatura ao longo da linha vertical passando pelo diâmetro do reservatório. A coincidência satisfatória mostrada garante a validade do código computacional empregado.

3. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou resultados do comportamento térmico e hidrodinâmico de reservatórios térmicos operando em situações similares àquelas sofridas por tanques isolados em

sistemas de aquecimento de água com energia solar. Os resultados foram obtidos através de simulação computacional gerada por um código previamente validado com dados experimentais. Como resultado foram obtidas imagens que demonstram a evolução da estratificação térmica nos tanques, ajudam a visualizar os fenômenos que ali ocorrem e, conseqüentemente, servem como ótima ferramenta didática para explicar aos alunos o comportamento dos reservatórios de sistemas de aquecimento de água com energia solar.

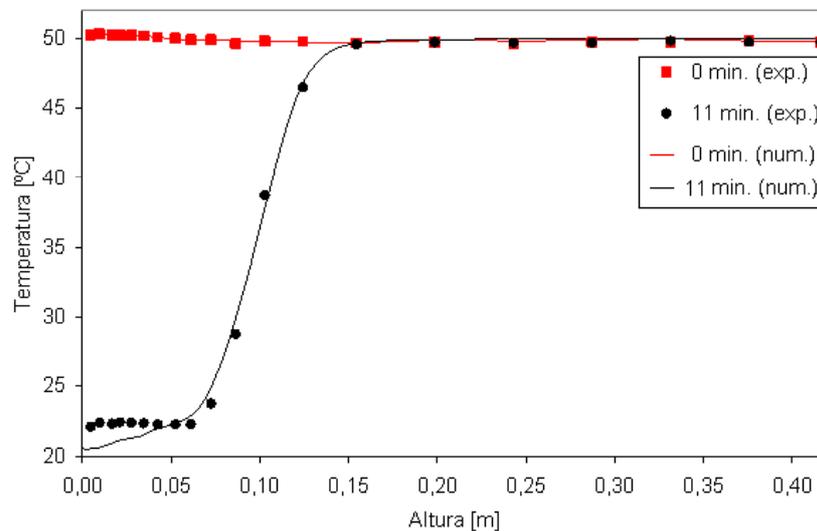


Figura 10– Comparação entre resultados numérico e experimental do perfil de temperatura ao longo do diâmetro, após consumo de 15 litros de água quente e ingresso de igual volume de água fria.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro na realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA), disponível em <http://www.abrava.com.br>, acessado em 10 de janeiro de 2006.
- Savicki, D. L. , Vielmo, H. A., Krenzinger, A., 2005, Three-Dimensional Analysis of the Temperature and Velocity Fields in Cylindrical Thermal Tanks, COBEM - 18th International Congress of Mechanical Engineering, 6-11, Ouro Preto, MG.

Abstract: *In this work, a study of thermal and hydrodynamic behavior of reservoirs connected with solar collectors is presented through a numerical three-dimensional simulation. The computational code solves the transient equations of the momentum and energy, making possible to describe the evolution of the temperature and velocity fields inside of the reservoir. It was studied typical situations that occur in solar energy water heating systems: 1) Inlet hot water on the top of the reservoir and outlet cold water on the bottom. 2) Inlet cold water on the bottom of the reservoir and outlet hot water on the top. 3) Inlet water on the top, colder than that existing originally in that height. Each case brings a different temperature profile, which formation process can be visualized by a transient animation. This kind of problem appears frequently in several disciplines of solar energy area and transport phenomena, between others. The animations generated in this work will be published on internet site, so that teachers and students can use them as didactic tool in the study of convective heat transfer problems.*

Key words: *Numerical three-dimensional simulation, Heat transfer, Fluid mechanics, Solar energy.*