

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA CONVECÇÃO NATURAL EM COLETOR SOLAR DE TUBO EVACUADO

Tiago Francisco Manea – tiagomanea@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica

Rejane de César Oliveski – decesaroo@gmail.com

Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Arno Krenzinger– arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. Este trabalho propõe uma avaliação qualitativa da convecção natural que ocorre no coletor solar de tubo evacuado. Para tanto foi utilizado o método de volumes finitos aplicado com a ferramenta de fluidodinâmica computacional ANSYS-FLUENT. Foram simuladas situações de irradiância sobre o tubo de 300, 500 e 800 W/m², combinadas a ângulos de inclinação do coletor de 30° e 45° em relação ao plano horizontal. Observou-se o comportamento no formato de pluma da água quente que sai do tubo em direção ao topo do reservatório. Verificou-se a dependência da velocidade do fluido na saída do tubo com a irradiância e com o ângulo de inclinação. Para ângulos maiores há velocidades maiores e, conseqüentemente, uma homogeneização maior da temperatura no reservatório. Entre o fluido aquecido que ascende ao reservatório e o que desce para o fundo do tubo há uma zona de cisalhamento, onde foi observada uma região de recirculação de fluido.

Palavras-chave: Coletor solar, Tubo evacuado, Simulação numérica, Convecção natural.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas solares para aquecimento de água são uma forma limpa de geração de energia. A sua aplicação mais comum é a voltada para o consumo doméstico, no qual este sistema é composto basicamente por coletor, reservatório, tubulação e uma fonte de energia auxiliar. O foco deste trabalho é o elemento principal deste sistema, o coletor solar, no qual é o responsável por converter a irradiância solar em energia térmica. Coletores planos são amplamente utilizados e já possuem uma tecnologia consolidada. No entanto, a participação de coletores de tubos de vidro evacuados já compreende mais da metade da capacidade mundial total instalada de coletores solares, segundo a *International Energy Agency* - IEA (2012), Fig. 1. Esta é a grande motivação para desenvolver pesquisas a respeito deste tipo de coletor.



Figura 1 – Distribuição da capacidade total instalada em operação por tipo de coletor em 2010.

Fonte: Adaptado de IEA (2012).

O aquecimento de água residencial para banho no Brasil consome uma importante parcela de energia elétrica gerada no país. Grande parte desta energia poderia ser suprida com energia solar, o que traria vantagens socioeconômicas e ambientais.

A utilização de coletores solares para aquecimento de água é, sem dúvida, um meio de obter energia térmica a um custo razoável e evitar maiores danos ao meio ambiente. Os coletores solares tradicionais, fabricados com chapa e tubos metálicos, conhecidos como coletores de placa plana atendem às necessidades de aquecimento de água para a maior parte das aplicações domésticas. Por este motivo, durante um bom tempo, o uso de outros tipos de coletores, como os que utilizam tubos a vácuo, ficou reservado exclusivamente para a aplicação industrial. Porém, nos últimos anos, o uso destes coletores tem se proliferado, principalmente a partir da participação massiva de países como a China na sua fabricação e utilização, conforme pode ser observado na Fig. 2. Isso o tornou competitivo no mercado voltado ao aquecimento de água para uso doméstico.

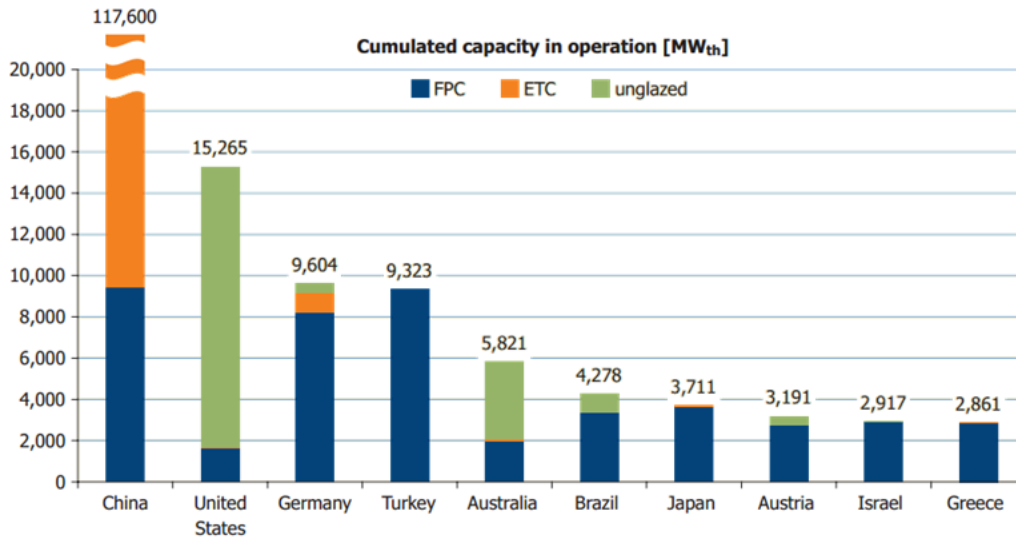


Figura 2 – Capacidade instalada de geração solar térmica até o final de 2010. Adaptado de IEA (2012).

Tendo em vista a penetração deste tipo de coletor no mercado de muitos países, o que já está ocorrendo em escala significativa, é importante realizar um amplo estudo que avalie aspectos técnicos deste conceito de coletor. Deste modo, este trabalho tem como objetivo principal analisar de forma qualitativa o movimento do fluido no interior destes coletores.

1.1 Coletor solar de Tubo Evacuado

Os coletores de tubo evacuado são constituídos por dois tubos de vidro concêntricos, evacuados entre si. O espaço evacuado garante um alto grau de isolamento térmico, o que faz com que este tipo de coletor tenha um melhor desempenho, comparado ao coletor plano, particularmente para temperaturas de operação elevadas.

Existem formas diferentes para extração da energia térmica do tubo a vácuo, a mais usual é a transferência direta, na qual o tubo de abertura única é acoplado ao reservatório e a água fica em contato direto com o tubo de vidro interno. Nessa configuração a água aquecida no topo do tubo interno, com menor massa específica, ascende ao reservatório, enquanto a água fria, com maior massa específica, é reposta pela parte inferior do tubo. O comportamento da circulação natural de fluido que ocorre entre o tubo e o reservatório foi investigado neste trabalho.

Coletores solares que utilizam tubo a vácuo minimizam a troca de calor por convecção externa e interna, colocando a superfície absorvedora em um ambiente quase totalmente evacuado de matéria. A troca de calor por radiação também é minimizada devido à superfície absorvedora ter baixa emissividade. Estas características põem este tipo de coletor em vantagem aos coletores planos quanto às perdas térmicas.

O tubo a vácuo é construído segundo o princípio do frasco de Dewar e seus elementos são mostrados na Fig. 3, os quais são: (1) tubo de vidro interno, (2) superfície seletiva, (3) espaço evacuado, (4) tubo de vidro externo, (5) grampo, (6) captador e (7) camada capturadora. Este modelo tem como princípio a construção de um frasco com dois tubos concêntricos, unidos nas extremidades e com vácuo entre si. Este frasco é semelhante ao utilizado em recipientes popularmente conhecidos como “garrafas térmicas”, utilizados para armazenar líquidos aquecidos ou resfriados.

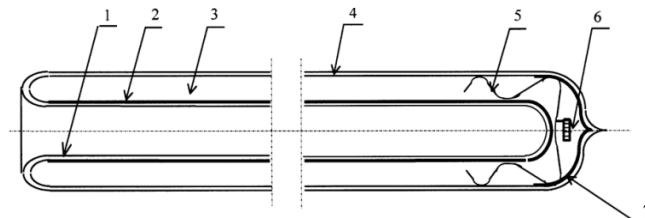


Figura 3 – Desenho esquemático de um tubo a vácuo. Fonte: Zhiqiang (2005).

Nestes modelos de tubos, uma superfície seletiva é depositada na parte externa do tubo de vidro interno. Esta é classificada como superfície de Absorção/Reflexão por possuir uma alta absorção nas bandas do espectro solar e alta reflexão na banda do infravermelho, o que corresponde uma baixa emitância para as temperaturas do absorvedor. O captador e a camada capturadora são responsáveis pela manutenção do vácuo removendo pequenas quantidades de gás do espaço evacuado que causariam troca de calor por convecção.

Há diversas formas para extração do calor absorvido pelo tubo a vácuo, algumas delas são descritas a seguir. A Fig. 4 (a) mostra a forma de extração de calor em que um tubo de calor (*heatpipe*) é inserido dentro do tubo a vácuo, estes são unidos com um selo entre o vidro e o metal. Na Fig. 4 (b) um tubo metálico em formato de “U” conduz o fluido a ser aquecido pelo interior do tubo a vácuo. O método de extração de calor do tipo transferência direta (*water-in-glass*),

representado esquematicamente na Fig. 4(c), é o mais utilizado dentre os citados devido sua simplicidade e seu baixo custo de fabricação (Morrison *et al.*, 2004). Neste tipo de extração o aquecimento provocado pela incidência de radiação solar faz a água aquecer e ascender ao reservatório pela parte superior do tubo, enquanto acontece a reposição desta pela parte inferior.

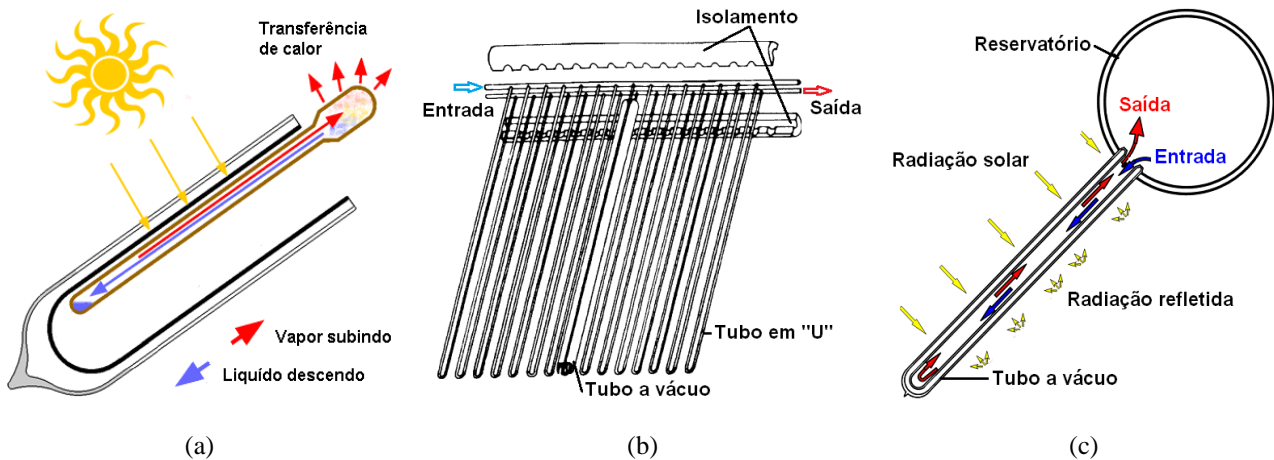


Figura 4 – Formas de extração de calor: (a) Tubo de calor; (b) Tubo em “U”; (c) Transferência direta. Fonte: modificado de Morrison *et al.* (2004).

Há dois tipos de coletores de tubos evacuados que utilizam transferência direta: coletor de passagem e coletor acoplado, mostrados respectivamente nas Fig. 5 (a) e (b). O coletor de passagem, Fig. 5(a), possui um “cabeçote”, ou distribuidor, que conecta todos os tubos para distribuir a água fria e coletar a água quente. Este distribuidor possui um volume interno próximo ao volume interno de um tubo. Assim, ele não armazena a água aquecida, mas sim a conduz para um reservatório. Já no outro tipo de coletor (Fig. 5(b)), os tubos são acoplados diretamente ao reservatório de água quente, o qual possui um volume interno muito maior que o “cabeçote” do coletor anterior.



(a)



(b)

Figura5– Coletores de tubo evacuado com transferência direta. (a) Coletor de passagem; (b) Coletor acoplado.

Este trabalho mantém o foco apenas no coletor acoplado, tendo como principal objetivo analisar alguns aspectos da interação entre um único tubo acoplado ao reservatório térmico através simulações numéricas por CFD (computer fluid dynamics).

2. ABORDAGEM NUMÉRICA

A proposta deste trabalho é simular numericamente o movimento de fluido, que acontece por convecção natural, em um tubo evacuado acoplado ao reservatório, enquanto este recebe um determinado fluxo de calor através do topo. O estudo é realizado em tubos circulares, inclinados com o eixo horizontal e o fluido de trabalho é água.

2.1 Modelo Geométrico

A geometria em análise está mostrada na Fig. 6. Simular o coletor exatamente como o modelo real teria um custo computacional muito grande. Sendo assim, para esta análise considerou-se o domínio característico mostrado na Fig. 6(a), onde o comportamento pode ser reproduzido para o restante do domínio, impondo-se assim condição de simetria dupla na região do tanque e simetria na metade do tubo. O domínio computacional é uma seção de 39 mm do coletor em que há simetria em ambos os lados do corte. Esta região começa na metade do espaçamento entre os tubos e termina na metade do tubo, conforme mostrado na Fig. 6 (a). A Fig. 6 (b) mostra o domínio computacional considerado nas simulações. O reservatório tem diâmetro interno de 356mm, o comprimento do tubo é de 1690mm, e o diâmetro interno do tubo é de 44 mm.

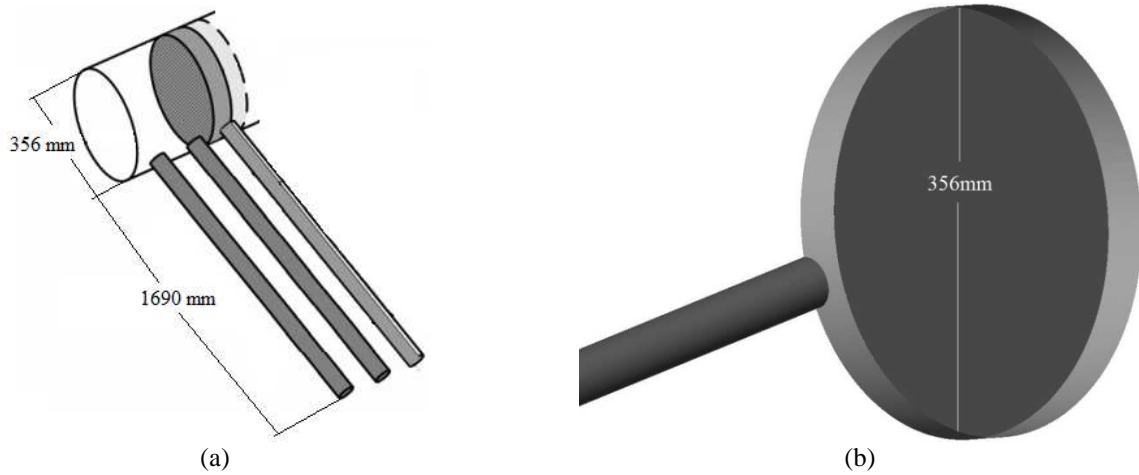


Figura 6 – Geometria considerada para as análises.

2.2 Modelo Numérico-Matemático

Para simular a convecção natural entre o tubo evacuado e o reservatório foi considerado que o fluido de trabalho é incompressível, o regime de escoamento é laminar e que as propriedades termofísicas da água são mantidas constantes com a temperatura, com exceção da massa específica. A variação da massa específica com a temperatura foi modelada utilizando a aproximação de Boussinesq.

O modelo matemático consiste nas equações diferenciais da conservação da massa (1), Navier-Stokes (2-4) e energia (5), conforme apresentado na seqüência.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

onde u , v e w são as componentes de velocidade nas direções x , y e z , respectivamente, ρ a massa específica, μ a viscosidade dinâmica, κ a condutividade térmica, p a pressão, c_p o calor específico e T a temperatura.

As condições de contorno são de simetria nas paredes de corte, não deslizamento e sem troca de calor nas paredes do tubo e do reservatório, com exceção da parte superior do tubo, onde a condição de contorno é de fluxo de calor constante. A condição inicial é de temperatura igual a 27 °C em todo domínio.

Para resolver o sistema de equações foi utilizado software ANSYS-FLUENT-14. A malha computacional utilizada é do tipo tetraédrica, possui, aproximadamente, $1,5 \times 10^6$ elementos e é mostrada na Fig. 7.

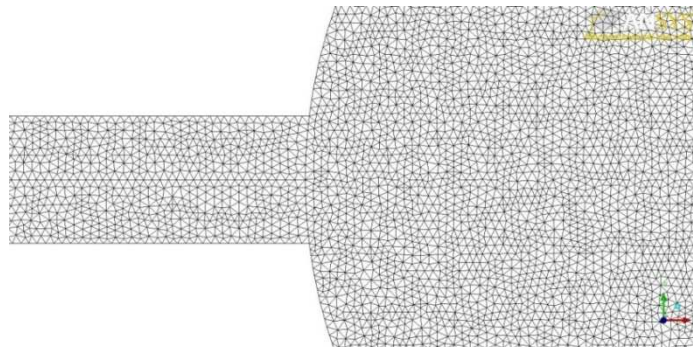


Figura 7 - Malha tetraédrica no plano de simetria.

3. RESULTADOS

3.1 Comparação experimental

Budihardjo (2004) realizou um ensaio experimental com um tubo inclinado a 45° em relação ao plano horizontal, acoplado a um reservatório retangular. Neste experimento um aquecedor de com potência de 500 W/m^2 foi utilizado para envolver o tubo a vácuo. Com o reservatório e o tubo preenchidos com água, Budihardjo mediu o campo de velocidades no reservatório com um *Particle Image Velocimetry* (PIV). Os resultados de Budihardjo podem ser vistos na Fig. 8(a) e comparados com aqueles obtidos neste trabalho (Fig. 8(b)). As duas figuras mostram a magnitude da velocidade no plano central do tubo, exatamente na seção de simetria. A cor vermelha representa a velocidade máxima, igual a 32 mm/s , para ambas as figuras. Esta velocidade foi obtida por Budihardjo em seu experimento e está muito próxima da velocidade máxima encontrada na simulação numérica, que foi $31,6 \text{ mm/s}$. Comparando visualmente as duas figuras, percebe-se que o comportamento fluidodinâmico, em ambos os casos, assume a forma de uma pluma que ascende para o topo do reservatório.

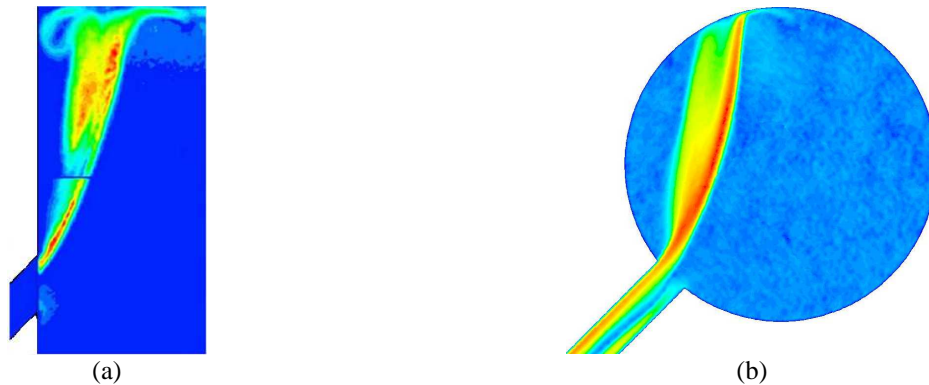


Figura 8 – Campo de velocidades: (a) experimental, Fonte, Budihardjo (2004); (b) simulado.

3.2 Perfil de velocidade na saída do tubo

Nas Fig. 9(a-b) são mostrados perfis de velocidade, no plano de simetria, na saída do tubo a vácuo para diversos casos estudados. A Fig. 9(a) mostra resultados para uma inclinação do tubo de 45° e três valores de irradiância (300 , 500 e 800 W/m^2). Já na Fig. 9(b) pode-se verificar a influência da inclinação do coletor (30 e 45°) para uma irradiância de 500 W/m^2 . Através delas pode-se observar que, apesar de todos os resultados apresentarem comportamento semelhante, indicando o escoamento descendente na parte inferior do tubo ($0-0,022 \text{ m}$) e ascendente na parte superior do tubo ($0,023-0,044 \text{ m}$), algumas diferenças podem ser vistas, principalmente no escoamento ascendente com variação da potência.

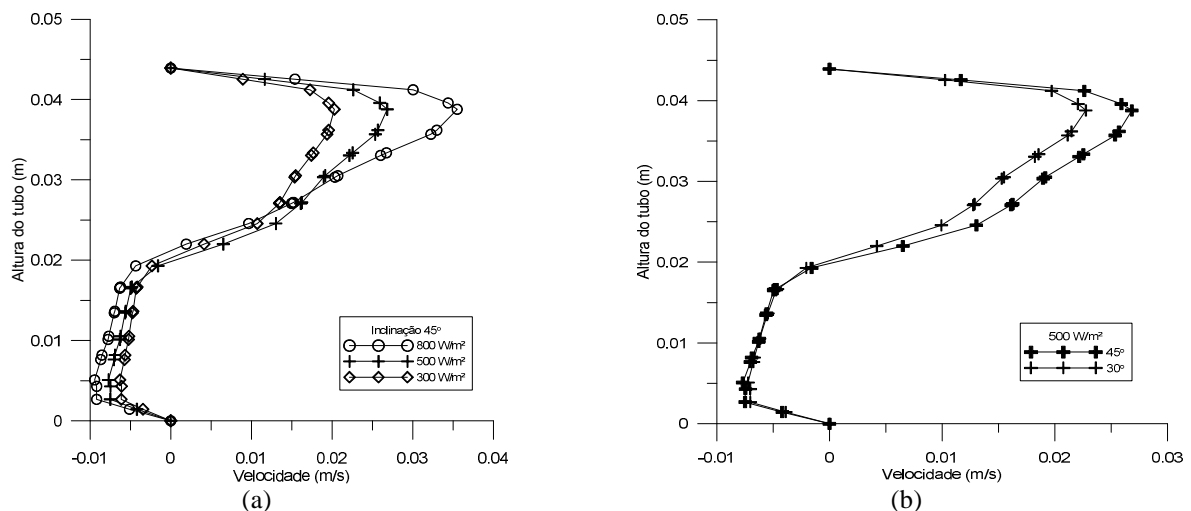


Figura 9 – Perfil de velocidade na saída do tubo para o reservatório: (a) para inclinação de 45° e irradiância de 800 , 500 e 300 W/m^2 ; (b) para irradiância de 500 W/m^2 e inclinação de 45° e 30° .

É possível observar também que o perfil de velocidade na seção de abertura do tubo é assimétrico e depende da irradiância solar. A região de saída do fluido no tubo, próximo ao topo, é mais estreita e possui vetores de velocidade com maior magnitude, o inverso ocorre na região de entrada de fluido no tubo, próximo a parte inferior deste.

3.3 Linhas de corrente

A trajetória de um fluido pode ser observada através de linhas de corrente. Assim, para uma maior compreensão do que ocorre no interior do tubo a vácuo, é apresentado na Fig. 10 linhas de corrente para um tempo de aquecimento 2000s, com potência de 800 W/m^2 e inclinações do coletor de: Fig. (a) 30° e Fig. (b) 45° .

Há uma divisão no interior do tubo entre a água aquecida ascende ao reservatório pela parte superior e a água que desce do reservatório para o tubo pela sua parte inferior. Esta divisão causa uma região de cisalhamento, onde a velocidade do escoamento é zero. pode-se observar, nesta região que próximo a conexão tubo-reservatório há uma recirculação do fluido, mostrada com maior detalhe na Fig. 10 (c).

A malha utilizada para observar esta recirculação de fluido é diferente das utilizadas nas simulações anteriores, tendo uma quantidade de volumes três vezes maior nesta região.

Outra informação possível de extrair na análise das linhas de corrente, é que a parte inferior do tubo, oposta a de conexão ao reservatório, tem uma participação modesta na convecção entre o tubo e o reservatório.

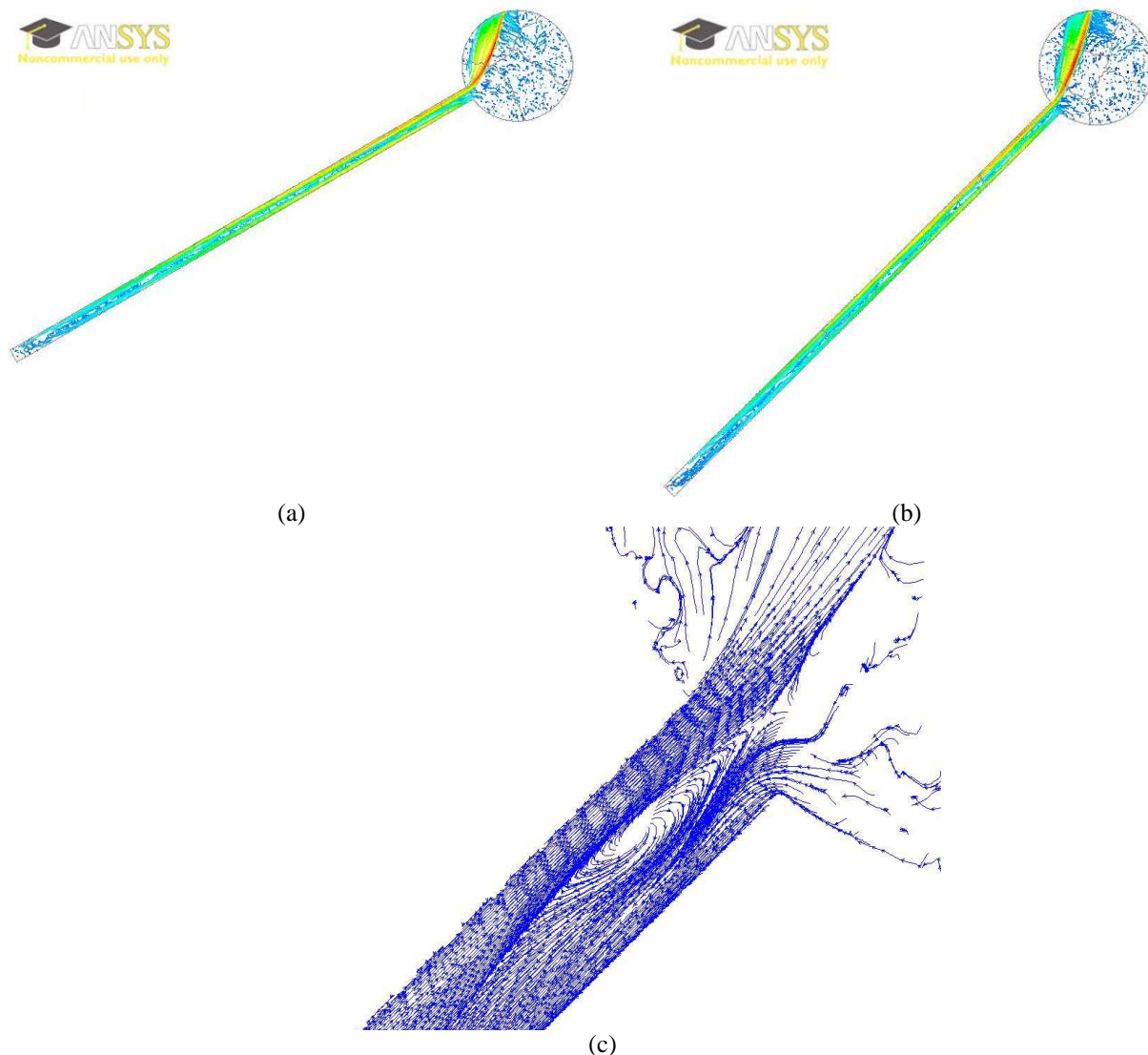


Figura 10 – linhas de corrente para irradiância de 800 W/m^2 : (a) para inclinação de 30° ; (b) para inclinação de 45° ; (c) para região de recirculação.

3.4 Estratificação térmica no reservatório

Analisou-se a estratificação térmica, ou campo de temperatura, no reservatório e na região de saída do tubo. A Fig. 11 mostra os resultados para as inclinações de 30° e 45° , Fig. 11 (a-b), respectivamente. Os campos de temperatura foram obtidos após 2000s de aquecimento a 800 W/m^2 .

Analisando a estratificação térmica nos dois casos representados na Fig. 11 é possível observar que, para o tubo com maior inclinação, Fig. 11(b), há uma homogeneização maior da temperatura do reservatório. Este fato é devido a ocorrência de maiores magnitudes de velocidade na convecção de fluido entre o tubo e o reservatório para uma maior inclinação, como já se observou no item 3.2.

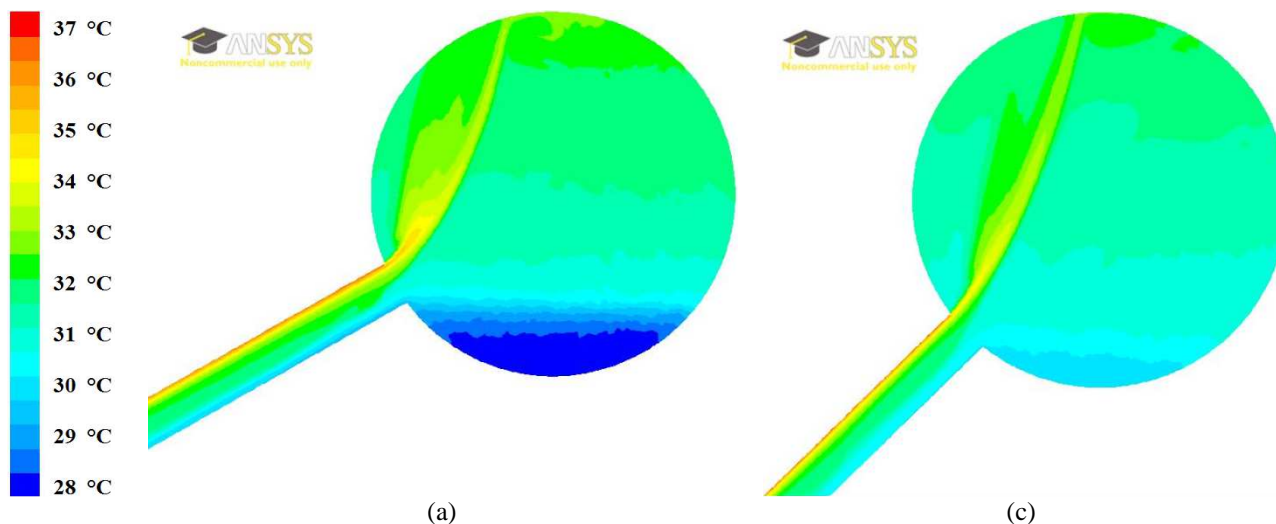


Figura 11 – Estratificação térmica no reservatório para 800 W/m^2 , com inclinação de: (a) 30° e (b) 45° .

Para a inclinação de 30° , Fig. 11(a), a temperatura da pluma logo na saída do tubo para o reservatório é maior que para 45° . Isso pode indicar que é necessário atingir uma temperatura maior na superfície do tubo para iniciar a convecção com o reservatório.

4. CONCLUSÃO

Através do software comercial ANSYS-FLUENT14 Foi simulado numericamente a convecção natural entre um tubo e o reservatório térmico de coletor solar de tubos evacuados. Variou-se o fluxo de calor na superfície do tubo, bem como sua inclinação referente ao plano horizontal.

Com o objetivo de obter-se uma validação do modelo numérico implementado, uma das simulações foi comparada com resultados experimentais de Budihardjo (2004), onde foi observado uma boa concordância entre estes. O comportamento da água em forma de pluma ascendendo do tubo para o reservatório ocorre de forma similar em ambos os casos.

Uma região de recirculação de fluido foi identificada próxima a seção de conexão do tubo com o reservatório onde há cisalhamento entre a corrente de fluido ascendente ao reservatório com a corrente no sentido contrário.

Verificou-se que, para coletores a vácuo com inclinações maiores, há maiores gradientes de velocidade, intensificado assim a convecção entre o tubo e o reservatório, o que o homogeneiza a temperatura no seu interior.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e INCT.

REFERÊNCIAS

- Budihardjo, I., Morrison, G. L., Behnia, M., 2004. Water-in-glass Evacuated Tube Solar Water Heaters. *Solar Energy*, vol 76, pp. 135–140.
- Morrison, G.L., Budihardjo, I., Behnia, M., 2004. Measurement and simulation of flow rate in a water-in-glass evacuated tube solar water heater, *Solar Energy*, vol 78, pp. 257–267.
- IEA, International Energy Agency, 2012. *Solar Heat Worldwide - Markets and Contribution to the Energy Supply 2010*, Gleisdorf.
- Zhiqiang, Y., 2005. Development of solar thermal systems in China. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol 86, p. 427–442.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons.

NUMERICAL SIMULATION OF AN EVACUATED TUBE SOLAR COLLECTOR COUPLED TO A RESERVOIR

Abstract. This paper proposes a qualitative evaluation of natural convection that occurs in the evacuated tube solar collector. For this purpose the finite volume method was applied using the computational fluid dynamics tool FLUENT. Irradiance values on the tube of 300 , 500 and 800 W/m^2 , combined with collector 30° and 45° inclination angles were simulated. The plume behavior of the hot water coming out of the tube toward the top of the reservoir was observed. It was found the dependence of the velocity of the fluid at the outlet of the tube with the irradiance and the tilt angle. For larger angles there are higher speeds and consequently a greater homogenization of the temperature in the reservoir. Between the heated fluid ascends the reservoir and which descends to the bottom of the tube there is a shear zone where a recirculation fluid was observed.

Key words: *Solar collector, Evacuated tube, Numerical simulation, Natural convection.*