

ANÁLISE TÉRMICA DE COLETOR SOLAR PLANO VIA SIMULAÇÃO CFD VALIDADA EXPERIMENTALMENTE POR TESTE EM SIMULADOR SOLAR

Paulo José Schiavon Ara (IPT / POLI-USP) - paulo.ara@usp.br

Daniel Setrak Sowmy (IPT) - dss@ipt.br

Resumo:

A expansão das energias renováveis continua sendo uma questão fundamental atualmente. Nesse âmbito, a energia solar térmica apresenta grande potencial. Para sua expansão, porém, é preponderante o desenvolvimento tecnológico dos coletores solares, que, por sua vez, passa pela disponibilidade de modelos e ferramentas para análise térmica desses equipamentos, a fim de alavancar o processo de aprimoramento da qualidade, durabilidade e eficiência térmica dos mesmos. Este trabalho propõe um modelo 3D utilizando fluidodinâmica computacional (CFD) para análise térmica de um coletor solar plano e a determinação de sua curva de eficiência. O artigo apresenta a concepção do modelo geométrico, a geração de malha e as hipóteses e simplificações adotadas no setup do problema de forma a simular o comportamento de um coletor solar de geometria e condições de operação conhecidas. A validação do modelo numérico foi realizada por meio de teste experimental e obteve-se boa concordância entre as curvas de eficiências obtidas numericamente e experimentalmente, embora o modelo apresente melhor acurácia para prever a eficiência térmica média ao invés da instantânea. O modelo permite estimar os ganhos de temperatura da água que escoar pelo coletor e obter a curva de eficiência térmica que correlaciona as condições de operação com a eficiência de conversão térmica instantânea. Os resultados também incluem a obtenção de contornos e perfis de temperatura e velocidade dentro do coletor.

Palavras-chave: *Coletor Solar Plano, CFD, Eficiência Térmica*

Área temática: *Conversão Térmica com coletores planos*

Subárea temática: *Coletores Solares Térmicos e Componentes do Circuito*

ANÁLISE TÉRMICA DE COLETOR SOLAR PLANO VIA SIMULAÇÃO CFD VALIDADA EXPERIMENTALMENTE POR TESTE EM SIMULADOR SOLAR

Paulo José Schiavon Ara – pauloara@ipt.br

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
Escola Politécnica da universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica

Daniel Setrak Sowmy – dss@ipt.br

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
Escola Politécnica da universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil

Resumo. A expansão das energias renováveis continua sendo uma questão fundamental atualmente. Nesse âmbito, a energia solar térmica apresenta grande potencial. Para sua expansão, porém, é preponderante o desenvolvimento tecnológico dos coletores solares, que, por sua vez, passa pela disponibilidade de modelos e ferramentas para análise térmica desses equipamentos, a fim de alavancar o processo de aprimoramento da qualidade, durabilidade e eficiência térmica dos mesmos. Este trabalho propõe um modelo 3D utilizando fluidodinâmica computacional (CFD) para análise térmica de um coletor solar plano e a determinação de sua curva de eficiência. O artigo apresenta a concepção do modelo geométrico, a geração de malha e as hipóteses e simplificações adotadas no setup do problema de forma a simular o comportamento de um coletor solar de geometria e condições de operação conhecidas. A validação do modelo numérico foi realizada por meio de teste experimental e obteve-se boa concordância entre as curvas de eficiências obtidas numericamente e experimentalmente, embora o modelo apresente melhor acurácia para prever a eficiência térmica média ao invés da instantânea. O modelo permite estimar os ganhos de temperatura da água que escoar pelo coletor e obter a curva de eficiência térmica que correlaciona as condições de operação com a eficiência de conversão térmica instantânea. Os resultados também incluem a obtenção de contornos e perfis de temperatura e velocidade dentro do coletor.

Palavras-chave: Coletor Solar Plano, CFD, Eficiência Térmica.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

De acordo com a Agência Internacional de Energia (2018) a demanda por energia térmica representa 47% do consumo energético global, o que mostra o potencial da energia solar térmica. O aproveitamento térmico da energia solar é realizado por meio de coletores solares, responsáveis pela absorção da radiação solar incidente e pela transferência de calor para a água/fluido que escoar em seu interior. Há diferentes tipos de coletores solares, com variações construtivas e nas condições de operação de forma que sirvam às mais diversas aplicações. Dentre as tecnologias existentes atualmente, o coletor fechado plano (*Flat Plate Collector - FPC*) é uma opção de ampla aplicação, especialmente para temperaturas abaixo de 100°C, a custos e níveis de manutenção relativamente inferiores às demais tecnologias de aproveitamento solar térmico (Badiei; Eslami; Jafarpur, 2020). Cada coletor possui sua equação eficiência térmica – na forma de polinômio de 2º grau – que descreve seu desempenho térmico (eixo das ordenadas) em diferentes condições de operação (eixo das abscissas). Pela curva de eficiência pode-se estimar a produção de energia do coletor para determinadas condições ambientais e de operação. A curva de eficiência, além de caracterizar o equipamento, é utilizada para dimensionamento de sistemas de aquecimento solar, estudos de viabilidade e esquemas de certificação ou etiquetagem de coletores solares. A obtenção da curva, por testes experimentais conforme normas nacionais (ABNT, 2009) e internacionais (ANSI/ASHRAE, 2003; ISO, 2017), demanda recursos financeiros e tempo. Além disso, experimentos, em geral, apresentam suas limitações quando se pretende realizar estudos paramétricos que demandam a fabricação de protótipos. Dado esse contexto, é interessante a concepção de modelos que possam prever numericamente o comportamento do coletor solar. O presente trabalho vai ao encontro desse objetivo, ao propor um modelo numérico que lê as características construtivas do coletor e por fluidodinâmica computacional (CFD) devolve sua a curva de eficiência térmica.

2 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é propor um modelo solucionável numericamente por fluidodinâmica computacional (CFD) para determinação da curva de eficiência térmica de coletores solares fechados planos (FPC). O trabalho se propõe

também a validar experimentalmente o modelo numérico. O modelo proposto permite a previsão da temperatura da água na saída do coletor para determinada temperatura da água na entrada, dadas às condições ambientais (radiação solar, temperatura ambiente, velocidade do ar), de operação (vazão de fluido) e geometria do coletor. Assim é possível obter, para um determinado coletor, a sua curva de eficiência térmica além de estudar o impacto de alterações construtivas e de operação no seu comportamento térmico.

3 REVISÃO DOS TRABALHOS ANTERIORES

Nos últimos 20 anos, com o avanço das técnicas de modelagem numérica, a fluidodinâmica computacional (CFD) começou a ser aplicada no estudo de coletores solares.

Gadi (2000) utilizou CFD para auxiliar no projeto de um coletor de baixo custo integrado em uma edificação. Fan; Shah; Furbo (2007) estudaram, via CFD, o comportamento de um coletor de tubos horizontais operando em termo sifão (sem bombeamento). Os autores verificaram a importância das forças decorrentes de diferenças de temperatura e densidade do fluido, além da convecção natural estabelecida no fluido de trabalho em circulação pelo coletor. Para vazões baixas a importância desse efeito é maior. Concluiu-se também que a uniformidade de distribuição de vazão entre os tubos contribui para a eficiência do coletor. Selmi; Ai-Khawaja; Marafia (2008) propuseram um modelo 3D utilizando CFD de um coletor de pequeno porte e simularam sua operação validando o modelo experimentalmente. Facão (2016) simulou um coletor solar fechado via CFD para analisar a distribuição das vazões nos tubos e verificou que a configuração de projeto que potencializa a eficiência térmica é aquela na qual a calha de saída tem diâmetro maior que a calha de entrada.

Ángel et al. (2013) utilizaram CFD para analisar dois tipos de coletores acoplados a reservatórios térmicos, um deles com tubos de seção circular e outro com tubos de seção retangular. O coletor com tubos cilíndricos obteve melhor desempenho decorrente de uma distribuição mais uniforme de vazão. O coletor com tubos de seção retangular apresentou regiões de estagnação, com número de Reynolds baixo, o que prejudicou a transferência de calor. Bassavanna; Shashishekar (2013) utilizaram os softwares de CFD para avaliar o desempenho de coletores solares com tubos de seção transversal triangular estudando a elevação de temperatura da água. Os resultados mostraram que a alternativa de projeto é interessante em termos de eficiência energética e que o modelo utilizado, no qual foi inserido apenas a placa e os tubos, prevê bem o desempenho do coletor. Cerón et al. (2015) desenvolveram um modelo em CFD para a simulação 3D de coletores solares planos adotando um número reduzido de simplificações. Placa, tubos, isolamento térmico, cavidade entre vidro e placa (*air gap*), as laterais e cantos do coletor foram incluídos nas simulações, além de modelos de turbulência. O modelo proposto é composto por subdomínios de forma a desacoplar a simulação.

Ekramian; Etemad; Haghsheenasfard (2014) utilizaram o software FLUENT CFD para investigar o efeito de diferentes configurações dos tubos do coletor na sua eficiência térmica. O domínio computacional 3D foi simplificado usando apenas um tubo e aproveitando a condição de simetria presente na aleta. Os resultados mostraram que a eficiência térmica é influenciada pela posição dos tubos em relação à placa absorvedora, sendo que a condição de tubo sobre a placa se mostrou mais eficiente do que o tubo sob a placa. Yadav; Bhagoria (2014) estudaram coletores a ar via simulações CFD com a proposta de inserção de rugosidades nos dutos de escoamento. O aumento da turbulência resultou em ganho na transferência de calor para o ar, porém resultou em aumento do atrito. Os resultados foram validados experimentalmente e o modelo mostrou boa acurácia.

He et al. (2016) propôs um coletor solar com dupla função de aquecedor e elemento arquitetônico e analisou-a via CFD. Os resultados mostraram a viabilidade da solução, inclusive com a presença de cobertura em forma de calha de maneira a integrar-se visualmente às edificações tradicionais chinesas. A análise paramétrica indicou que a temperatura de entrada da água e a irradiância solar incidente são inversamente proporcionais à eficiência térmica enquanto que a vazão do fluido e a temperatura ambiente são diretamente proporcionais.

Gunjo; Mahanta; Robi (2017) simularam um coletor solar utilizando como domínio computacional o conjunto tubo e aleta determinando a temperatura de saída da água do coletor. Em outro trabalho (Gunjo; Mahanta; Robi, 2017) utilizaram o mesmo modelo para analisar um coletor de tubos com curvas para aplicação em sistema que fornece energia para aproveitamento de biogás. O trabalho utilizou a abordagem de eficiência exérgica ao invés da eficiência energética.

Hosseinzadeh et al. (2018) modelou um painel fotovoltaico-térmico (*PVT*) a base de nano-fluidos e obteve eficiências elétricas cerca de 9% maiores que um painel fotovoltaico convencional com uma redução de 20% na temperatura da célula. Maouassi et al. (2018) também utilizou fluidodinâmica computacional para estudar coletores solares térmicos operando com nano-fluidos. Embora ocorra uma elevação na eficiência térmica, ocorre também o aumento da perda de carga na tubulação devido à presença das partículas sólidas. Wang et al. (2015) simularam em CFD um coletor solar com tubos de calor (*heat pipe*) e uma placa absorvedora com superfície corrugada que aloja os tubos. Os resultados indicaram a melhora na eficiência térmica com o aumento da vazão, porém com uma tendência de estabilização para elevadas vazões. A inclinação variável também foi simulada resultando em melhor desempenho para baixos valores de inclinação do coletor para a localidade estudada (Gangzhou, China).

Qader et al. (2019) simularam via CFD um coletor a ar com aletas inclinadas para aumento da turbulência e intensificação da transferência de calor. Os autores determinaram o parâmetro de desempenho termo-hidráulico (*THPP*), que relaciona o ganho de energia por transferência de calor com a perda de energia por aumento do atrito. A

otimização do *THPP* em função do número de *Reynolds*, inclinação, passo e comprimento das aletas foi realizada pelo método de superfície de resposta (*RSM*). Os autores comprovaram a viabilidade da solução.

4 MÉTODO

4.1 Determinação da curva de eficiência experimental

A eficiência térmica instantânea do coletor é definida como a razão entre a energia térmica produzida e a energia total solar incidente. A Eq.1 mostra o cálculo da eficiência térmica η :

$$\eta = \frac{\dot{m} \times c_p \times \Delta T}{AG} \quad (1)$$

Sendo $\dot{m}$ a vazão mássica do fluido que escoar pelo coletor, em kg/s, c_p o calor específico do fluido, em J/kg.°C e AG o produto da área coletora pela irradiância solar incidente, em W.

A curva de eficiência instantânea do coletor é uma equação de 2º grau, a seguir:

$$\eta = \eta_0 - a_1 T_m^* - a_2 G (T_m^*)^2 \quad (2)$$

Sendo a temperatura média reduzida T_m^* definida pela Eq.3:

$$T_m^* = \frac{T_m - T_a}{G} \quad (3)$$

Onde T_m a temperatura média do fluido no coletor, em °C, T_a a temperatura ambiente, em °C e G a irradiância solar global incidente sobre o coletor, em W/m². Os coeficientes η_0 , a_1 e a_2 são constantes determinadas experimentalmente.

A curva da Eq.2 caracteriza o coletor solar, fornecendo a eficiência térmica para diferentes condições ambientais e de operação. O método utilizado para determinar a curva do coletor experimentalmente é descrito a seguir:

- Instalação do coletor solar na bancada de teste e instalação do circuito hidráulico para circulação de água no coletor, conforme Fig.1;

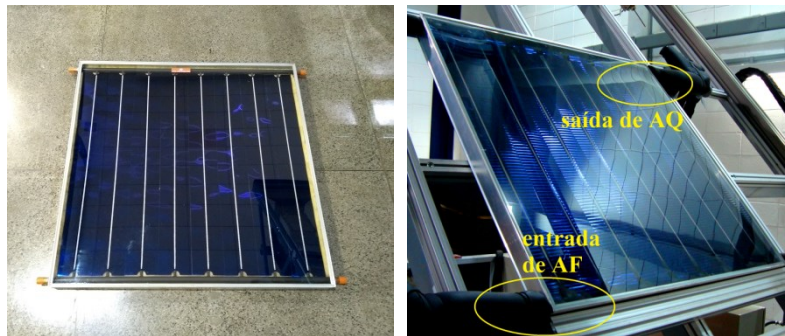


Figura 1 – (a) Coletor solar estudado. (b) Instalação do coletor na bancada de teste

- Instrumentação da bancada: Instalação de termo resistência (PT100) para medição de temperatura da água fria (AF) na entrada do coletor e instalação de termo resistência (PT100) para medição de temperatura da água quente (AQ) após seu escoamento pelo coletor e aquecimento;

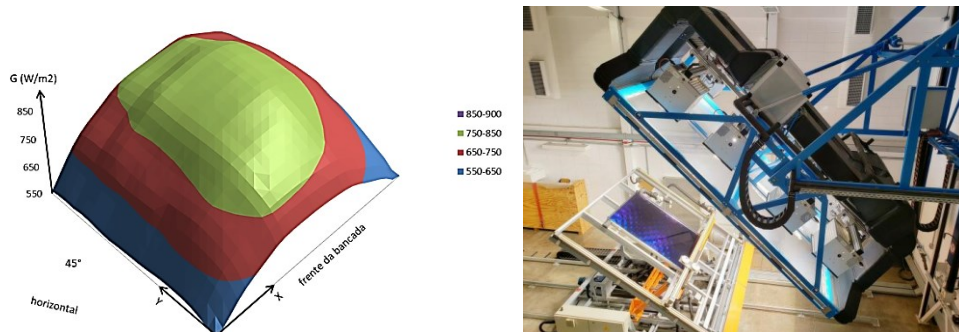


Figura 2 – (a) Mapeamento da radiação solar no plano do coletor. (b) simulador com lâmpadas ligadas.

- Ligação das lâmpadas do simulador solar: a irradiância no plano do coletor é medida por um piranômetro que pode ser movimentado na bancada, mapeando no espaço a radiação incidente (Fig.2).
- Execução do ensaio conforme ABNT NBR 15747-2 (2009):
 - Períodos em regime permanente a 7 diferentes temperaturas de entrada de água (Fig. 3);
 - Medição da vazão em kg/s na entrada do coletor;
 - Medição da temperatura ambiente por termo resistência (PT100).

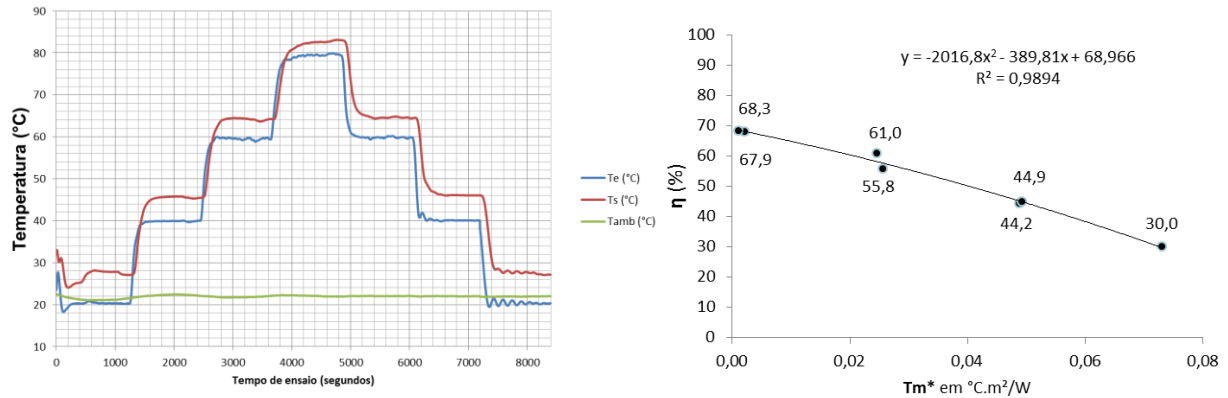


Figura 3 – (a) Medições de temperatura no teste¹. (b) curva de eficiência com os 7 pontos experimentais.

- Cálculo da eficiência instantânea pela Eq. 1 para cada condição de regime permanente;
- Cálculo da temperatura média reduzida T_m^* pela Eq.3 para cada período de regime permanente;
- Obtenção da curva da Fig.3 e obtenção dos coeficientes η_0 , a_1 e a_2 da Eq.2;

4.2 Determinação da curva de eficiência por CFD

O método para a determinação da curva de eficiência por CFD consistiu nos seguintes passos:

- Concepção do modelo geométrico para representar o coletor (Fig.4). Embora o coletor possua diversos tubos, foi considerada a hipótese de tubo único (região do modelo da Fig.4) que leva em consideração que o coletor pode ser aproximado pela repetição sucessiva de elementos lateralmente justapostos. A vazão de fluido de um tubo foi aproximada pela vazão total dividida pela quantidade de tubos do coletor.

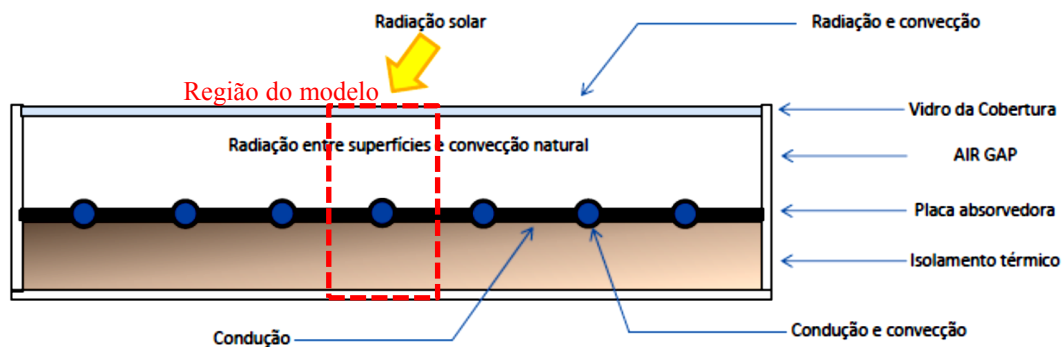


Figura 4 – Modelo geométrico.

- O domínio em CFD é composto por 3 zonas de simulação (Fig.5): Ar, isolante térmico e água.

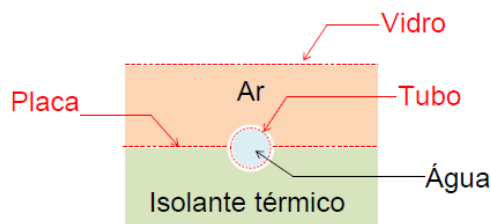


Figura 5 – Zonas de simulação e interfaces entre zonas.

¹ Os índices "e", "s" e "amb" correspondem respectivamente à entrada, saída e ambiente.

- *Air Gap*: espaço preenchido de ar entre vidro de cobertura e interface com placa e tubo, delimitado pela superfície de vidro (topo), placa e tubo metálicos, laterais de simetria (normais ao eixo x) e laterais adiabáticas (normais ao eixo y). Nessa zona ocorre convecção natural e radiação de calor entre as superfícies;
- Água: espaço preenchido por fluido dentro do tubo de elevação. A simplificação de adotar a temperatura de entrada da água no domínio igual à temperatura de entrada no coletor decorre do fato que a calha coletora (elemento que distribui a água pelos tubos) produz um incremento de temperatura desprezível no fluido. Da mesma forma ocorre com a temperatura de saída, sendo considerada a mesma nas saídas do modelo e do coletor (Fig.6):

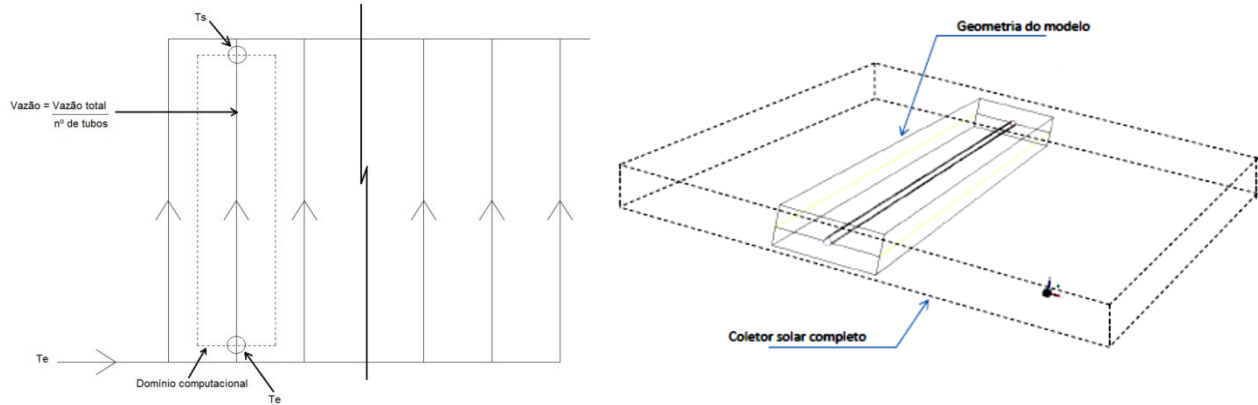


Figura 6 – (a) Vista superior do modelo. (b) vista perspectiva do modelo.

- Isolamento: espaço preenchido de material isolante térmico (neste caso Lã de Vidro) entre a placa absorvedora e base do coletor à temperatura ambiente.

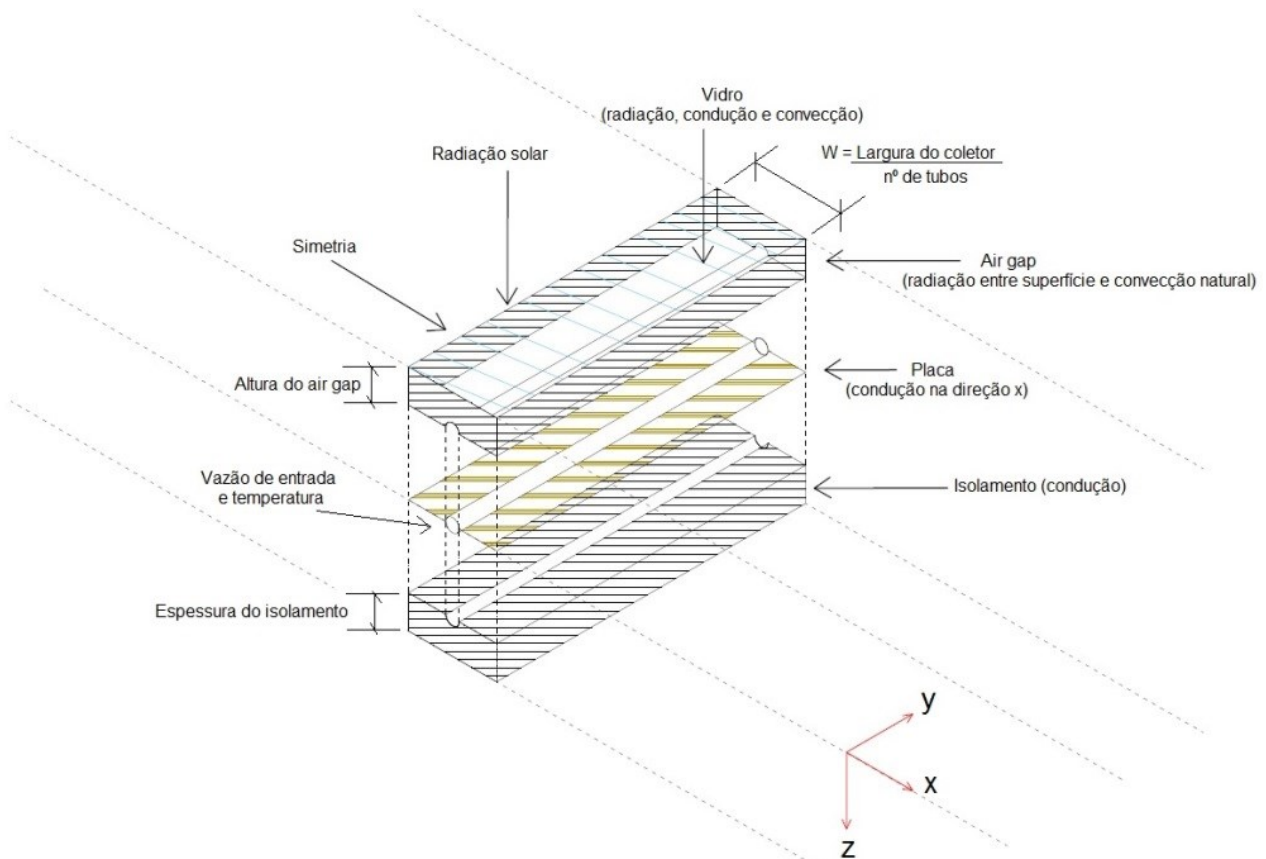


Figura 7 – Modelo adotado para simulação em CFD.

- Geração de malha de volumes finitos (malha hexaédrica) pelo método *Patch Conforming*;

- Configuração das condições de contorno do problema (Fig.8):
 - Superfície superior do air gap: troca de calor por convecção forçada com o vento e incidência de radiação solar (*Solar Ray Tracing Method*);
 - Superfícies laterais com condição de simetria (normais a x);
 - Superfícies laterais adiabáticas (normais a y);
 - Superfície inferior do isolamento: temperatura constante igual à ambiente;
 - Interface entre air gap e isolamento, representando a placa absorvedora com condução de calor da placa para o tubo (*Shell conduction*).
 - Entrada de água na vazão total dividida pelo número de tubos do coletor;
 - Temperatura de entrada da água no domínio igual à temperatura de entrada do coletor e temperatura de saída do domínio igual à temperatura de saída do coletor;
 - Radiação Térmica dentro do air gap, entre as paredes aquecidas (*S2S Method*);
 - Turbulência: modelo $k - \varepsilon$ RNG e convecção natural.

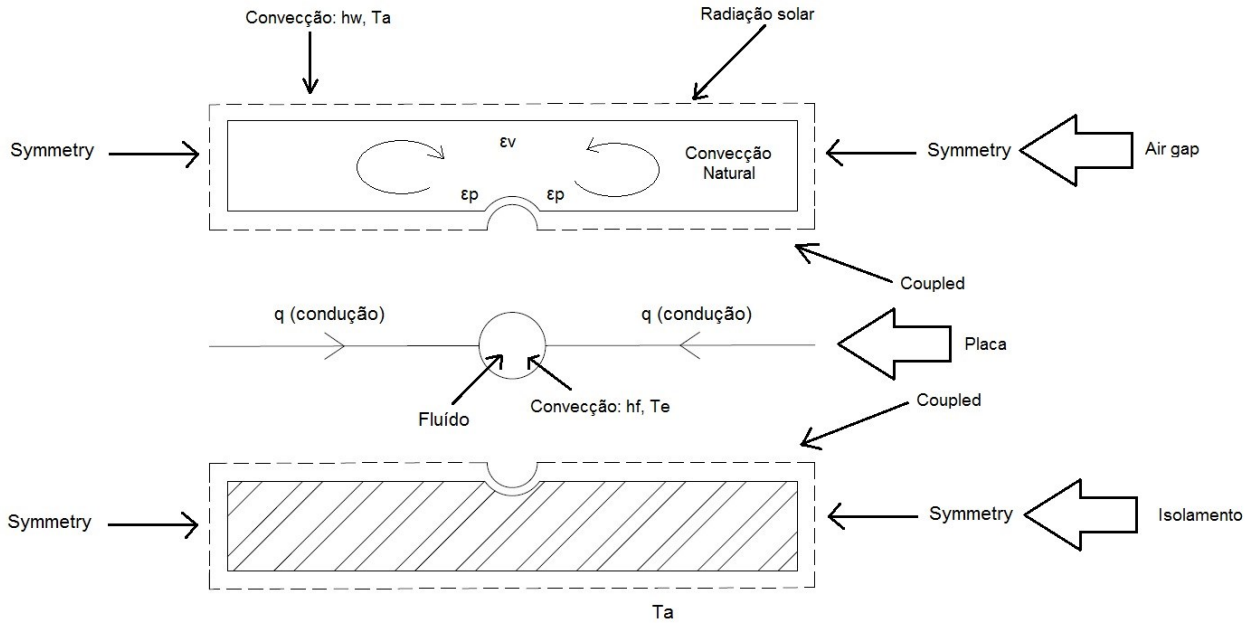


Figura 8 – Condições de contorno adotadas para simulação em CFD.

- Resolução numérica das equações governantes (Eq.4) para cada volume finito do domínio:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) \right] + \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \phi) \right] = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \right] + S_{\phi} \quad (4)$$

Sendo ϕ a quantidade transportada através de um meio de massa específica ρ , Γ a constante de difusão, (u, v, w) os componentes da velocidade do escoamento e S_{ϕ} o termo fonte.

As equações são resolvidas para quantidade de movimento (*momentum*), velocidade, continuidade e energia. Para os elementos sólidos não há os componentes relativos ao escoamento e a Eq.(5) é solucionada com a quantidade transportada $\phi = T$, a constante de difusão $\Gamma = \alpha$ onde α é a difusividade térmica e termo fonte S_{ϕ} nulo.

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\alpha \text{ grad } T) = 0 \quad (5)$$

Sendo $\alpha = k/\rho c_p$, onde k a condutividade térmica do fluido e c_p o calor específico do material.

As condições de contorno nas paredes, além da condição de não escorregamento (no-slip), foram impostas pelo modelo composto de convecção e radiação de calor indicado pela Eq.(6) (ANSYS, 2019).

$$q = h_f(T_s - T_f) + q_{\text{rad}} \quad (6)$$

Sendo q_{rad} o fluxo de calor da superfície para o elemento fluido, h_f o coeficiente local de transferência de calor do fluido, T_s a temperatura da superfície e T_f a temperatura do fluido.

5 RESULTADOS

5.1 Resultado experimental

O teste experimental resultou na seguinte curva de eficiência, expressa pela Eq.7:

$$\eta = 0,690 - 3,898 T_m^* - 0,025 G(T_m^*)^2 \quad (7)$$

5.2 Resultado obtido por CFD

Temperaturas do fluido na saída. Para as temperaturas de entrada no coletor de 20°C, 40°C, 60°C e 80°C foram simuladas em CFD as temperaturas de saída da água. O acréscimo nas temperaturas é mostrado na Fig.9.

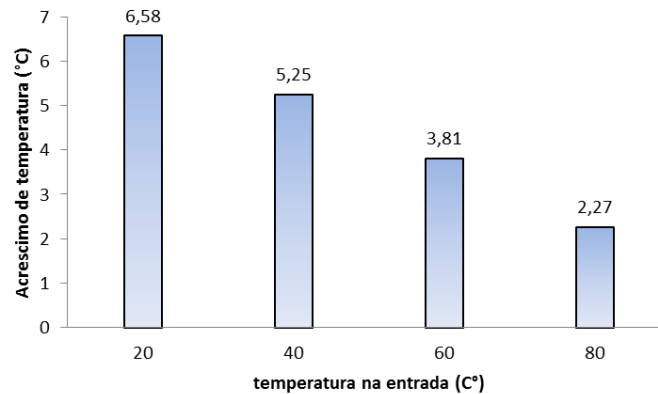


Figura 9 – Temperaturas de saída resultantes da simulação.

Temperatura do fluido no coletor. Foram determinados os perfis de temperatura interiormente ao coletor.

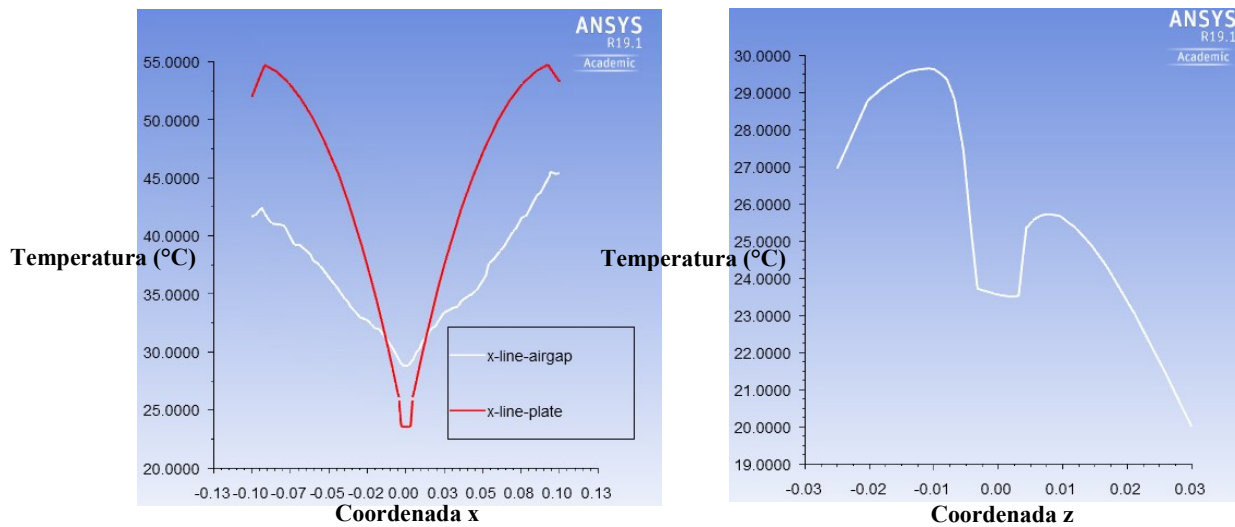


Figura 10 – Temperaturas no interior do coletor (esquerda) em x (direita) em z

Contornos de temperatura. As simulações resultaram em gráficos de distribuição de temperatura pela seção transversal média do domínio (Fig.11), contornos de velocidade do ar (Fig.12) e temperaturas na placa.

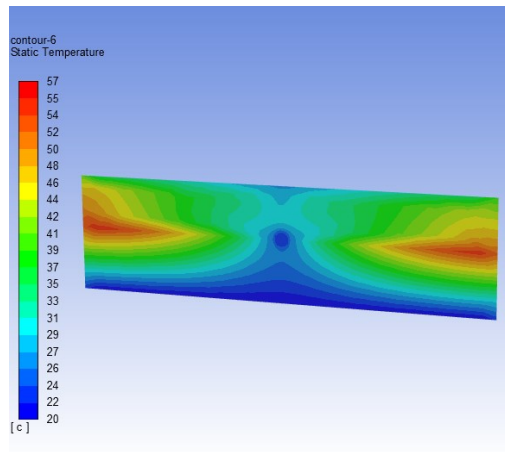


Figura 11 – Contornos de temperatura na seção transversal média da placa.

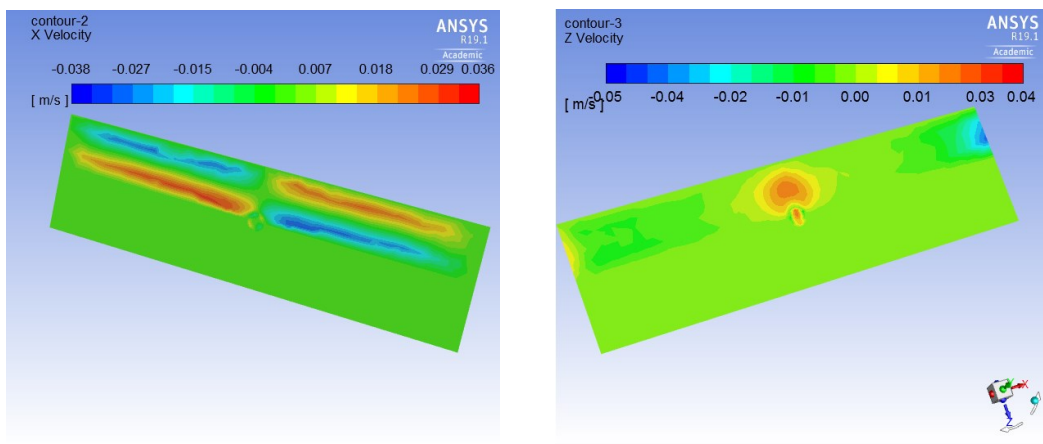


Figura 12 – Contornos de velocidade do ar na seção transversal média da placa.
(esquerda) em x (direita) em z

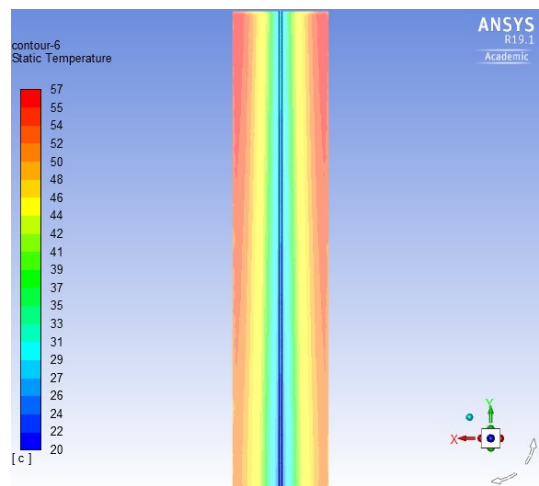


Figura 13 – Contornos de temperatura na placa para $T_e = 20\text{ °C}$.

Como mostra Fig.13, a temperatura da placa cresce na direção do escoamento e cresce na direção perpendicular ao tubo, como é apresentado na bibliografia. A Fig.14 mostra como a temperatura da água varia na seção transversal do coletor, maior junto às paredes.

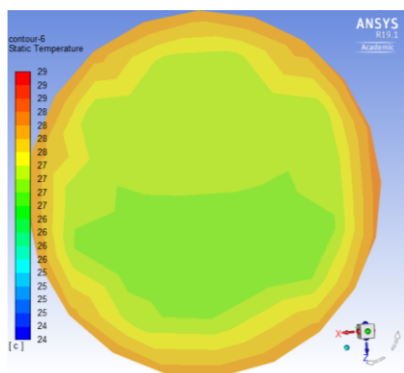


Figura 14 – Contornos de temperatura na seção transversal média para $T_e = 20^\circ\text{C}$.

5.2 Validação dos resultados

A validação dos resultados numéricos foi realizada comparando a curva de eficiência experimental com a curva de eficiência simulada, conforme é mostrado na Fig.15.

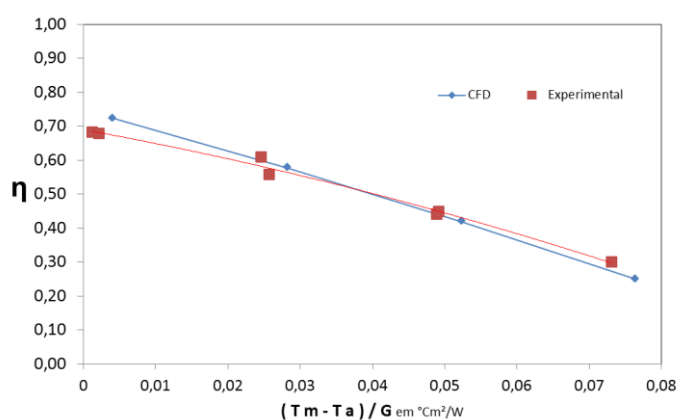


Figura 15 – Curvas de eficiência numérica e experimental.

O desvio entre a eficiência térmica simulada (linha azul da Fig.14) e a experimental (linha vermelha da Fig.14) foi de 5,66% para $T_m^* = 0 \text{ m}^2\text{C/W}$ e de -2,68% para $T_m^* = 0,08 \text{ m}^2\text{C/W}$. O modelo numérico forneceu a mesma eficiência instantânea que a curva experimental para $T_m^* = 0,03935 \text{ m}^2\text{C/W}$, o que corresponde, em um cenário de temperatura ambiente de 20°C e irradiância solar de 1000 W/m^2 , à temperatura média do fluido de aproximadamente 59°C . Tendo como base a Fig.15 e adotando-se, por hipótese, que a eficiência média do coletor pode ser calculada pela integral da curva de eficiência entre $T_m^* = 0 \text{ m}^2\text{C/W}$ e $T_m^* = 0,08 \text{ m}^2\text{C/W}$ dividido por $0,08 \text{ m}^2\text{C/W}$, obtém-se que a eficiência média pelo modelo CFD foi de 49,58% e pelo teste experimental foi de 49,13%. Utilizando os conceitos de estatística, os pontos experimentais possuem um desvio padrão residual (s_r) de 4,58% em relação ao modelo CFD.

6 CONCLUSÃO

O modelo numérico em fluidodinâmica computacional proposto neste trabalho foi capaz de gerar uma curva de eficiência de um coletor solar plano a partir de seus dados geométricos e de operação. A curva gerada via simulação numérica apresentou boa concordância com a obtida experimentalmente, sendo que os pontos experimentais tiveram um desvio padrão residual inferior a 5% em relação ao modelo CFD. A acurácia da curva de eficiência é maior para valores de T_m^* próximos a $0,04 \text{ m}^2\text{C/W}$, fazendo com que o modelo possa ser utilizado como boa ferramenta de previsão da eficiência térmica média. Além disso, as simulações forneceram contornos e perfis de temperatura nas regiões internas do coletor mostrando que há gradientes significativos de temperatura na placa e circulação natural de ar na cavidade entre o vidro e a placa.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 15747-2. Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores Solares, v. Parte 2: M, p. 124, 2009.
- Ángel, M.-D. J. et al. Analysis of Flow and Heat Transfer in a Flat Solar Collector with Rectangular and Cylindrical Geometry Using CFD. Ingeniería, Investigación y Tecnología, v. 14, n. 4, p. 553–561, 2013.
- ANSI/ASHRAE. Standard 93-2003. Methods of tests to determine the thermal performance of solar collectors, p. 45, 2003.

- ANSYS. Fluent User's Guide - Fluent 19.1. Disponível em: <<https://ansyshelp.ansys.com>>. Acesso em: 13 mar. 2019.
- Badiei, Z.; Eslami, M.; Jafarpur, K. Performance improvements in solar flat plate collectors by integrating with phase change materials and fins: A CFD modeling. *Energy*, v. 192, p. 116719, 2020.
- Basavanna; Shashishekar. CFD Analysis of triangular absorber tube of a solar flat plate collector. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, v. 2, n. 1, p. 19–24, 2013.
- Cerón, J. F. et al. A coupled numerical model for tube-on-sheet flat-plate solar liquid collectors. Analysis and validation of the heat transfer mechanisms. *Applied Energy*, v. 140, p. 275–287, 2015.
- Ekramian, E.; Etemad, S. G.; Haghshenasfard, M. Numerical Analysis of Heat Transfer Performance of Flat Plate Solar Collectors. *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*, v. 1, 2014.
- Facão, J. Optimization of flow distribution in flat plate solar thermal collectors with riser and header arrangements. *Solar Energy*, v. 120, p. 104–112, 2016.
- Fan, J.; Shah, L. J.; Furbo, S. Flow distribution in a solar collector panel with horizontally inclined absorber strips. *Solar Energy*, v. 81, n. 12, p. 1501–1511, 2007.
- Gadi, M. B. Design and simulation of a new energy-conscious system (CFD and solar simulation). *Applied Energy*, v. 65, n. 1–4, p. 251–256, 2000.
- Gunjo, D. G.; Mahanta, P.; Robi, P. S. CFD and experimental investigation of flat plate solar water heating system under steady state condition. *Renewable Energy*, v. 106, p. 24–36, 2017.
- Gunjo, D. G.; Mahanta, P.; Robi, P. S. Exergy and energy analysis of a novel type solar collector under steady state condition: Experimental and CFD analysis. *Renewable Energy*, v. 114, p. 655–669, 2017.
- He, W. et al. CFD and comparative study on the dual-function solar collectors with and without tile-shaped covers in water heating mode. *Renewable Energy*, v. 86, p. 1205–1214, 2016.
- Hosseinzadeh, M. et al. Optimization and parametric analysis of a nanofluid based photovoltaic thermal system: 3D numerical model with experimental validation. *Energy Conversion and Management*, v. 160, n. December 2017, p. 93–108, 2018.
- IEA. Solar Heat Worldwide. USA - Cedar: 2018. 19p. (Solar Heating and Cooling Programme Report 2018 - Newsletter v.68).
- ISO. ISO 9806 - Solar energy - Solar thermal collectors - test methods. v. 2013, p. 90, 2017.
- Maouassi, A. et al. Heat exchanges intensification through a flat plate solar collector by using nanofluids as working fluid. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, v. 10, n. April, 2018.
- Qader, B. S. et al. RSM approach for modeling and optimization of designing parameters for inclined fins of solar air heater. *Renewable Energy*, v. 136, p. 48–68, 2019.
- Selmi, M.; Al-Khawaja, M. J.; Marafia, A. Validation of CFD simulation for flat plate solar energy collector. *Renewable Energy*, v. 33, n. 3, p. 383–387, 2008.
- Wang, N. et al. Numerical study of flat plate solar collector with novel heat collecting components. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 69, p. 18–22, 2015.
- Yadav, A. S.; Bhagoria, J. L. Heat transfer and fluid flow analysis of an artificially roughened solar air heater: A CFD based investigation. *Frontiers in Energy*, v. 8, n. 2, p. 201–211, 2014.

FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR THERMAL ANALYSIS VIA CFD MODEL VALIDATED BY EXPERIMENTAL TESTS USING INDOOR SOLAR SIMULATOR

Abstract. *The expansion of renewable energies remains a fundamental issue today. In this context, solar thermal energy has great potential. However, for its expansion, the technological development of solar collectors is critical, which, in turn, involves the availability of models and tools for thermal analysis of this equipment, in order to leverage the process of improving the quality, durability and solar collector thermal efficiency. This work proposes a 3D model using computational fluid dynamics (CFD) for thermal analysis of a flat plate solar collector and the determination of its efficiency curve. The paper presents the design of the geometric model, the mesh generation and the hypotheses and simplifications adopted in the problem setup in order to simulate the behavior of a solar collector of known geometry and operating conditions. The validation of the numerical model was performed by means of an experimental test and good agreement was obtained between the efficiency curves obtained numerically and experimentally, although the model presents better accuracy to predict the average thermal efficiency instead of the instantaneous one. The model allows estimating the temperature gains of the water flowing through the collector and obtaining the thermal efficiency curve that correlates the operating conditions with instantaneous thermal efficiency. The results also include temperature and velocity contours and profiles inside the collector.*

Key words: Flat Plate Collector, CFD, Thermal efficiency.