Desenvolvimento de Novos Coletores Solares de Condicionamento de Ar e Refrigeração

Ivan M. Corgozinho, Lucas P. P. Faria, Elizabeth M. D. Pereira, André G. Ferreira, Rudolf Huebner, Othon L. Procópio, Matheus M. Herzog

***Resumo* – Este trabalho apresenta os resultados iniciais do desenvolvimento de um modelo de simulação computacional de coletores solares de placa com dupla cobertura de vidro utilizando o método dos volumes finitos. O modelo foi desenvolvido na plataforma Ansys CFX a partir de uma geometria tridimensional completa do coletor, simplificando apenas o domínio da camada de isolante térmico. A eficiência do coletor resultante foi de 75,4%, com a temperatura de entrada do fluido igual à temperatura ambiente. São também discutidos aspectos específicos dos fenômenos fluidodinâmicos envolvidos, como perfil de vazão e temperatura, que exercem influência no desempenho térmico global e cuja análise pode ser explorada com o auxílio do modelo desenvolvido, com grande riqueza de detalhes.**

***Palavras-chave* – Coletor solar, energia solar, simulação computacional, volumes finitos.**

I. Introdução

Este trabalho está inserido no contexto do projeto de P&D "PA - Desenvolvimento de novos coletores solares para sistemas solares de condicionamento de ar e refrigeração", código PD-4950-0438/2011, cujo foco é o desenvolvimento de sistemas solares de condicionamento de ar e refrigeração e cuja coordenação técnico-científica é de responsabilidade do Centro Universitário UNA, em Belo Horizonte - MG.

A grande importância do desenvolvimento de sistemas de ar-condicionado solar reside na coincidência dos picos de disponibilidade do recurso solar com os picos de demanda de energia elétrica pelos sistemas convencionais de condicionamento de ar, tanto temporal como geograficamente, representando uma contribuição potencialmente elevada na redução da necessidade de reforços na rede de distribuição, além da economia de energia.

Neste sentido, o projeto de pesquisa PD-4950-0438/2011 foi dividido em quatro linhas principais, a primeira executada por um grupo de pesquisadores e estudantes responsável pela concepção dos ciclos termodinâmicos de refrigeração, absorção e adsorção, a segunda focada em sistemas de captação utilizando coletores concentradores lineares Fresnel, a terceira linha responsável por um estudo e projeto alternativo de sistemas de captação com concentração utilizando concentradores circuncilíndricos com absorvedor fixo e foco móvel. A quarta linha de pesquisa, na qual se concentra o presente trabalho, buscou o desenvolvimento de coletores solares de placa plana com características especiais que garanta eficiência adequada para em faixas de temperatura mais elevadas do que as obtidas pelos coletores convencionais encontrados no mercado. O desenvolvimento de tais coletores poderá trazer a grande vantagem de aliar uma nova gama aplicações para a energia solar com a tecnologia atualmente melhor estabelecida na indústria nacional de equipamentos de energia solar.

Atualmente a pesquisa encontra-se em fase de desenvolvimento, sendo que, no que se refere ao desenvolvimento de novos coletores de placa plana mais eficientes, o presente trabalho avança até a etapa de elaboração de um modelo de simulação computacional detalhado, utilizando o método dos volumes finitos. Este modelo de simulação permitirá obtenção de previsões do desempenho dos protótipos, anteriormente à sua fabricação, bem como comparação com resultados experimentais após os ensaios de laboratório.

II. Estado da arte

A evolução da tecnologia de coletores solares recebe significativa contribuição de pesquisas na área de modelagem matemática e experimental que possibilitam a obtenção de correlações empíricas, simulações e otimização de parâmetros vários, visando tanto a melhoria do desempenho dos coletores como o desenvolvimento de novos conceitos e redução dos custos de fabricação. A seguir, apresenta-se uma breve síntese de trabalhos relevantes encontrados na literatura.

Carbonell et al. realizaram uma comparação entre dois modelos dinâmicos de coletores solares de placa plana em condições de termossifão, ou seja, funcionamento em circu-

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VIII CITENEL), realizado na cidade Costa do Sauípe/BA, no período de 17 a 17 de agosto de 2015.

Os autores agradecem à Cemig e à CAPES pelo apoio financeiro.

I. M. Corgozinho é bolsista de mestrado da CAPES no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET MG (e-mail: ivanmagela@yahoo.com.br).

L. P. P. Faria é professor titular no Centro Universitário Uni BH (e-mail: lppf@ig.com.br).

E. M. D. Pereira é professora titular no Centro Universitário Uni BH (e-mail: bethduarte00@gmail.com).

A. G. Ferreira é professor titular no Centro Federal de Educação Tenológica de Minas Gerais – CEFET MG (e-mail: agferreira@deii.cefetmg.br)

R. Huebner é professor titular na Universidade Federal de Minas Gerais (e-mail: Rudolf@ufmg.br).

O. L. Procópio é aluno de mestrado do Centro Federal de Educação Tenológica de Minas Gerais – CEFET MG (e-mail: othon.procopio@gmail.com)

M. M. Herzog é Engenheiro de Soluções Energéticas da Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG (email: matheus.herzog@cemig.com.br)

lação natural [1]. O primeiro foi baseado numa extensão do modelo Duffie-Beckman que inclui efeitos transientes utilizando o método dos volumes finitos. O segundo modelo, denominado de Curva Eficiência Modificada (*Modified Efficiency Curve*), foi obtido a partir da curva de eficiência resultante de ensaios laboratoriais incluindo termos adicionais de momentum que incorporam o efeito termossifão. Verificou-se que ambos os modelos se mostraram adequados para predição dos resultados experimentais. Variações nas condições de operação tais como temperatura de entrada em intervalos de tempo inferiores à constante de tempo do coletor, no entanto, apresentaram boa correspondência entre o modelo de Duffie-Beckman estendido e resultados experimentais, porém o modelo da Curva de Eficiência Modificada se mostrou limitado nestas condições.

Zambolin e Col estudaram, experimentalmente, o comportamento de coletores solares do tipo tubo evacuado e de placa plana em condições em regime permanente e em ensaio quase-dinâmico, isto é, com condições ambientais de radiação, temperatura ambiente e velocidade do vento livres [2]. Os resultados foram apresentados em forma de curvas de eficiência instantânea e diária, que computa uma grande variedade de condições operativas e ângulos de incidência da radiação solar. Verificou-se que o coletor solar de placa plana é mais eficiente em faixas de menor temperatura, quanto o tubo evacuado apresenta maior eficiência em temperaturas mais baixas, sendo observados dois pontos de equilíbrio distintos no gráfico de eficiência x diferença de temperatura reduzida $(T_e - T_a)/G$, 0,037 m²K/W em regime permanente e 0,027 m²K/W no ensaio quase-dinâmico.

O trabalho realizado por Akhtar e Mullick apresenta um modelo analítico para avaliação do coeficiente de perda de calor pelo topo de coletores solares de placa plana com dupla cobertura de vidro, bem como a temperatura da superfície, com erro máximo de 1% [3]. Martín et al. utilizou o software de simulação TRNSYS para avaliar o comportamento termofluidodinâmico de um coletor solar com fitas de chapa metálica torcida (*wire-coil inserts*) inseridas nos tubos do circuito hidráulico, cujos resultados apontam aumento de 4,5% de eficiência em relação aos coletores comuns [4].

Subiantoro e Tiow desenvolveram um modelo de cálculo do coeficiente de perda de calor e otimização de coletores de placa plana [5]. Trata-se de um modelo que dispensa o cálculo iterativo e, portanto, de baixo custo computacional. Entre os resultados obtidos destaca-se o espaçamento ótimo de 10mm entre a placa absorvedora e a cobertura que levou ao menor coeficiente de perdas térmicas. Os autores compararam o modelo analítico com os resultados obtidos em simulações bidimensionais realizadas utilizando o pacote Ansys Fluent observando discrepâncias abaixo de 9%. [6] utilizou uma estratégia de controle ótimo de vazão mássica para maximizar da extração de exergia da radiação solar utilizando coletores de placa plana. Também Farahat et al. elaboraram um modelo de otimização exergética de coletores, porém com maior quantidade de variáveis independentes, variando tanto parâmetros de operação como projeto, obtendo correspondência satisfatória com resultados experimentais apresentados previamente na literatura [7]. Um dos aspectos interessantes deste trabalho foi a constatação de que a eficiência energética não tem pontos de máximo local ou global em relação às condições operativas, no entanto, a eficiência exergética apresenta ponto de máximo local e global em relação às estas mesmas variáveis. Kalogirou [8] utilizou redes neurais artificiais para prever o desempenho de coletores placa plana. Foram utilizados seis modelos de redes neurais utilizados para estimação dos coeficientes da equação padrão de eficiência de coletores, obtendo valores de eficiência calculados muito próximo dos dados experimentais. O autor destaca a rapidez e simplicidade de aplicação do método como principais vantagens em relação os métodos tradicionais.

Em um trabalho de modelagem numérica e experimental, Badache et al. avaliaram o desempenho de coletores abertos de ar transpirado [9]. O modelo numérico foi baseado em uma análise 2D pelo método dos volumes finitos, para cálculo das equações de RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) acopladas à equação de conservação de energia. Para realização das simulações foi utilizado o software Ansys Fluent V12.1.4, cujos resultados obtidos se aproximam satisfatoriamente dos resultados experimentais.

Modelos numéricos de simulação tridimensionais estão igualmente disponíveis na literatura. O trabalho desenvolvido em [10] apresenta um modelo 3D baseado no método dos volumes finitos para avaliação transiente dos fluxos de calor em coletores de diversas topologias, como placa plana, coletor serpentina, de placas paralelas, entre outros. A validação do modelo foi concluída para um coletor de placa plana convencional de tubos paralelos, a partir da comparação com resultados de ensaios laboratoriais realizados no Instituto Fraunhofer, sendo verificada uma correspondência satisfatória. Menezes et al. utilizaram o método dos volumes finitos através do programa Ansys CFX para estudar o comportamento não uniforme do escoamento em coletores de placa plana e seu efeito sobre a eficiência térmica do mesmo [11]. Os resultados foram comparados com dados de ensaios laboratoriais, observando-se concordância satisfatória. Os autores destacam a importância do trabalho no que diz respeito ao incentivo de novas pesquisas focadas na avaliação do perfil de escoamento em associações série e paralelo de coletores bem como a influência no desempenho global do sistema.

A contribuição deste trabalho consiste em apresentar uma análise numérica tridimensional de um modelo de coletor solar de placa plana com duas coberturas de vidro, utilizando o método dos volumes finitos. O método foi aplicando à geometria completa do coletor, utilizando o software Ansys CFX, incluindo os domínios fluidos de água e ar e os domínios sólidos da placa absorvedora de alumínio, circuito hidráulico de cobre e coberturas de vidro, apenas não foi simulado o material isolante da base, pois foi admitido como isolante perfeito, portanto adiabático.

III. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O coletor solar de placa plana é um equipamento projetado e utilizado para conversão de energia solar radiante em energia térmica, pelo aumento da temperatura de um fluido

de trabalho, geralmente água. Neste sentido, o coletor deve apresentar elementos que possibilitem:

a) Placa absorvedora, ou aletas, de cobre ou alumínio, responsável pela captação e absorção de energia solar, pintada com tinta preto-fosco para aumentar a absortividade da superfície;

b) Circuito hidráulico, geralmente de cobre, acoplado à placa absorvedora, responsável transferência de calor para o fluido de trabalho;

c) Isolamento térmico, na superfície inferior da placa absorvedora, que portanto não recebe quantidade significativa de radiação solar, utilizado para minimização das perdas térmicas para o ambiente;

d) Cobertura superior de vidro transparente, utilizada para redução das perdas térmicas para o meio ambiente através da superfície superior da placa absorvedora, sem comprometer drasticamente a captação de energia pela placa;

e) Caixa externa, confeccionada em perfil de alumínio, é responsável pela rigidez mecânica e matriz de montagem do coletor solar.

A Figura 1 ilustra um modelo de coletor solar de placa plana e seus componentes:

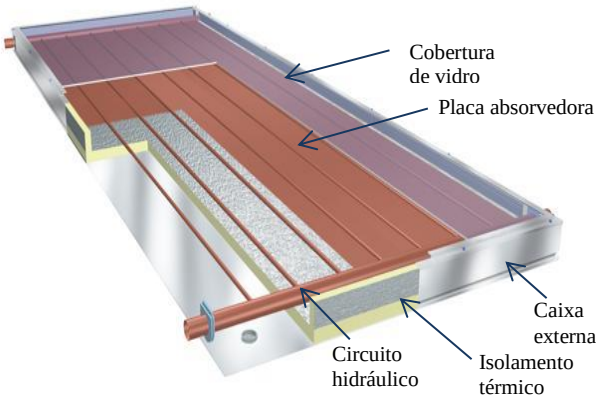


Figura 1. Componentes de um coletor solar de placa plana

IV. DESCRIÇÃO DO MÉTODO

O método dos volumes finitos se baseia na conversão de um conjunto de equações diferenciais em um sistema linear com grande número de equações algébricas, através da discretização do domínio em pequenos volumes ou elementos.

O Teorema de Transporte de Reynolds, aplicado a um volume diferencial, permite uma formulação unificada das equações de balanço para uma propriedade genérica do fluído φ, que pode ser massa, energia, momentum, entropia, etc, de acordo com (1).

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}}_{\text{Termo transiente}} + \underbrace{\boldsymbol{\nabla}\cdot(\rho\varphi\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{n})\cdot\boldsymbol{n}}_{\text{Termo convectivo}} = \underbrace{\boldsymbol{\nabla}\cdot(\Gamma\boldsymbol{\nabla}\varphi)}_{\text{Termo difusivo}} + \underbrace{S_\varphi}_{\text{Termo fonte}} \tag{1}$$

Onde,

t é o tempo, [s];

$\boldsymbol{\nabla}$ vetor gradiente, $\frac{\partial}{\partial x}\boldsymbol{i} + \frac{\partial}{\partial y}\boldsymbol{j} + \frac{\partial}{\partial z}\boldsymbol{k}$;

ρ densidade do fluido, função das coordenadas de tempo e espaço $\rho = \rho(x, y, z, t)$, [kg/m³];

$\boldsymbol{V}$ vetor de velocidades, $\boldsymbol{V} = u(x, y, z, t)\boldsymbol{i} + v(x, y, z, t)\boldsymbol{j} + w(x, y, z, t)\boldsymbol{k}$, [m/s];

S_φ fonte volumétrica de geração de φ.

Γ é a difusividade de φ e $\boldsymbol{n}$ é o vetor unitário normal à superfície de controle diferencial.

A solução do sistema de equações diferencias a partir de (1), aplicada a cada propriedade de interesse resulta da integração do mesmo conjunto de equações ao longo do volume de controle.

$$\int_{vc} \frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}\,d\forall + \int_{vc} \boldsymbol{\nabla}\cdot(\rho\varphi\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{n})\cdot\boldsymbol{n}\,d\forall = \int_{vc} \boldsymbol{\nabla}\cdot(\Gamma\boldsymbol{\nabla}\varphi)d\forall + \int_{vc} S_\varphi d\forall \tag{2}$$

Onde ∀ é o volume de controle de integração, [m³]. Pela aplicação do Teorema da Divergência de Gauss, a equação apresentada em (2) pode ser reescrita como:

$$\int_{vc} \frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}\,d\forall + \int_{sc} (\rho\varphi\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{n})\cdot\boldsymbol{n}\,ds = \int_{sc} (\Gamma\boldsymbol{\nabla}\varphi)ds + \int_{vc} S_\varphi d\forall \tag{3}$$

Para análises em condições de regime estacionário, como é o caso deste trabalho, o termo transiente em (3) desaparece, tornando-se:

$$\int_{sc} (\rho\varphi\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{n})\cdot\boldsymbol{n}\,ds = \int_{sc} (\Gamma\boldsymbol{\nabla}\varphi)ds + \int_{vc} S_\varphi d\forall \tag{4}$$

O ponto central no desenvolvimento da técnica dos volumes finitos é a discretização da equação apresentada em (4), pela qual domínio computacional é representado por um conjunto de pontos, denominados nós, interconectados, formando uma malha. A Figura 2 ilustra o procedimento de

discretização do domínio em pequenos elementos e volumes de controle, para os quais se aplicam as equações de conservação, neste caso a representação bidimensional foi adotada por simplicidade.

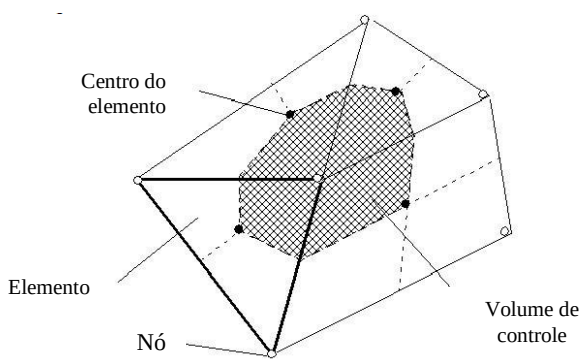


Figura 2. Representação bidimensional de um elemento de controle em uma malha

No CFX, os valores das variáveis fluidodinâmicas são armazenados nos nós, enquanto os volumes de controle, no qual se aplicam as equações de conservação são formados por regiões limitadas por superfícies imaginárias que dividem os elementos adjacentes aos nós relativos a cada volume de controle, conforme mostrado pela Figura 2.

Portanto, pode se escrever (4) em sua forma discreta como:

$$\sum_i \dot{m}_i \varphi_i = \sum_i \Gamma \boldsymbol{\nabla} \varphi_i \mathrm{s}_i + \overline{S_\varphi} \forall \tag{5}$$

Onde a variável i se refere ao índice das faces da superfície de controle $\dot{m}_i = (\rho\varphi \boldsymbol{V} \cdot \boldsymbol{n}) \cdot \boldsymbol{n}\, \mathrm{s}_i$ é a vazão mássica que deixa o volume de controle pela face i, $\overline{S_\varphi}$ é o valor médio do termo fonte ao longo do volume de controle.

A equação (5)(5) representa a formulação do método dos volumes finitos para um sistema em regime permanente. O termo do lado esquerdo e o primeiro termo do lado direito, por serem calculados nas faces do volume de controle, estabelecem os vínculos matemáticos entre volumes de controle adjacentes, necessários para a obtenção de um sistema consistente de equações algébricas.

Pode se demonstrar, a partir de (5) e considerações geométricas acerca dos elementos da malha, que o acoplamento das equações para cada volume de controle resulta em um sistema linear do tipo apresentado em (6).

$$\sum_{vz_i} a_i^{vz} \varphi_i^{vz} = \mathrm{b}_i \tag{6}$$

Onde os a_i são coeficientes constantes, o índice vz é uma referência aos elementos da vizinhança adjacentes ao nó i, e b é o termo independente da equação.

Para obtenção de detalhes adicionais relativos à formulação e implementação do método dos volumes finitos recomenda-se a consulta de livros-textos especializados no assunto, como Versteeg (2007).

V. METODOLOGIA COMPUTACIONAL

O procedimento de elaboração do modelo de simulação foi realizado utilizando o software Ansys CFX, programa internacionalmente reconhecido como uma das principais ferramentas para análises computacionais pelo método dos volumes finitos. O programa tem uma interface amigável, que permite a elaboração de uma modelo de simulação sem a necessidade implementar um código em linguagem de programação para discretização do domínio e resolução das equações de governo, cabendo ao usuário a definição da geometria, determinação dos controles para geração de malha e configurações dos domínios, materiais e modelos utilizados.

A Figura 3 resume as etapas de simulação aplicadas neste trabalho.

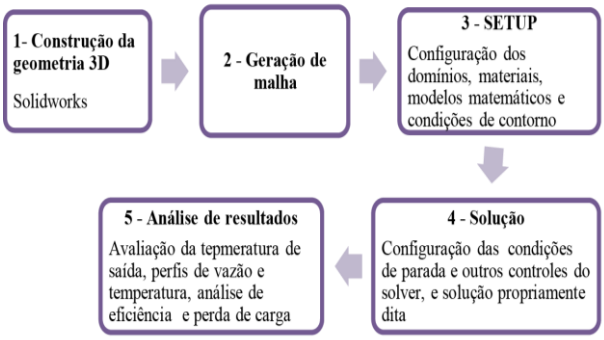
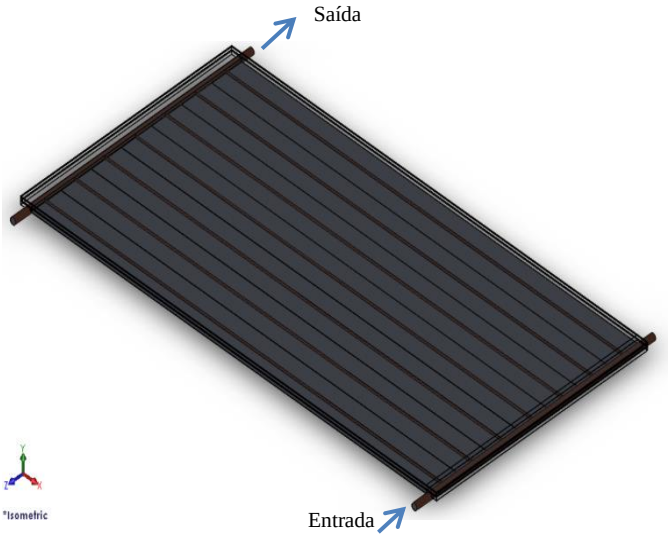


Figura 3. Fluxograma de etapas do processo de elaboração da simulação

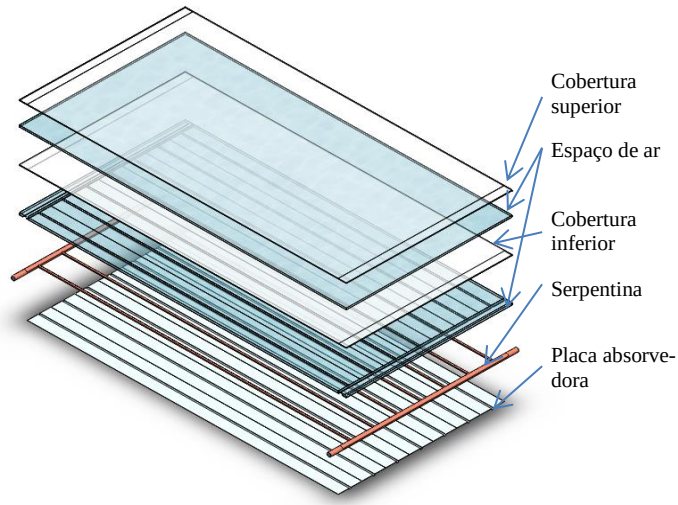
A. *Construção da geometria tridimensional*

O modelo geométrico tridimensional do coletor foi elaborado utilizando o software Solidworks.

Na Figura 4 (A) e Figura 4 (B) são mostradas uma vista isométrica e explodida, respectivamente, da construção geométrica tridimensional do coletor solar simulado.



(A)



(B)

Figura 4. Modelo tridimensional do coletor, (A) vista isométrica e (B) vista explodida.

As dimensões principais dos dois modelos geométricos estudados estão resumidas na Tabela I.

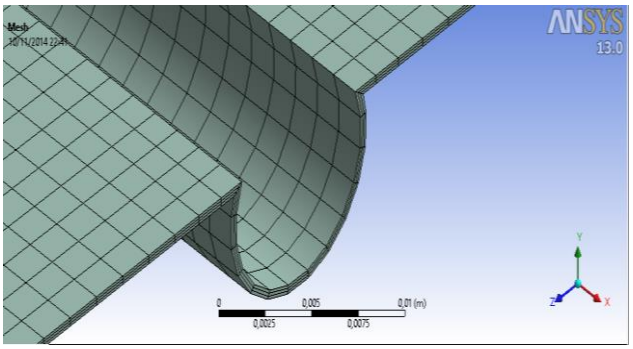
Tabela I. Características dimensionais do modelo geométrico do coletor

Dimensão	**Medida (mm)**
Diâmetro do manifold divisor	21
Diâmetro do manifold combinador	22
Diâmetro dos tubos de elevação	8,7
Comprimento do manifold divisor e combinador	1030
Comprimento da placa absorvedora	1705
Largura da placa absorvedora	930
Espaçamento entre a placa absorvedora e a primeira cobertura de vidro	11
Espaçamento entre os vidros	9
Espessura dos vidros	3
Espessura da placa absorvedora	0,4

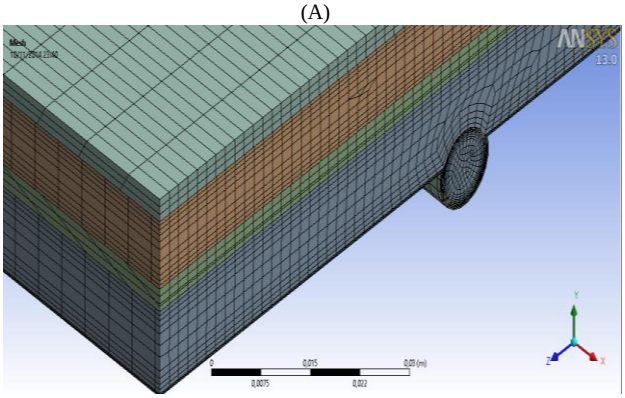
B. Geração de malha

A geração de malha é o processo de discretização do domínio em elementos formados por nós em seus vértices. O módulo de geração de malha do pacote da Ansys denominado *Meshing* foi utilizado para execução desta etapa. Para cada um dos domínios, isto é, tubos, fluido, aletas, ar e vidros, foram utilizados controles de malhas específicos para otimização da malha obtida, uma vez que existe um compromisso entres precisão de resultados da simulação e redução de custo computacional, que apresentam tendências inversas ao tamanho da malha gerada.

Para a maioria dos domínios buscou-se utilizar modelos de malhas prismáticas que permitem a obtenção de uma malha mais estruturada, o que representa maior qualidade do ponto de vista dos erros introduzidos na simulação devido a imprecisões no cálculo de gradientes em regiões com elementos muito destorcidos. Para tanto, utilizou-se métodos de geração de malha por varredura, ou *"sweep"*, pelo qual a malha gerada pode ser entendida como a replicação de uma malha bidimensional ao longo de uma direção perpendicular à superfície 2D. Esta metodologia é ilustrada na Figura 5 (A), na qual é apresentado o detalhe da malha de uma aleta. Por ter espessura fina em relação às outras dimensões da aleta, foi utilizada uma variação do método de varredura denominado *"thin sweep"*, pelo qual se permite que a superfície do padrão de malha bidimensional tenha formato genérico incluindo superfícies curvas, por outro lado, a dimensão na direção da varredura deve ser relativamente pequena. Na Figura 5 (B) apresenta-se uma seção transversal do coletor, apresentando a malha gerada para todos simulados.



(A)



(B)

Figura 5. Detalhe da malha gerada, (A) detalhe da aleta e (B) corte transversal.

Outro controle de malha bastante utilizado foi o método denominado *"inflation"*, o qual se assemelha ao método *thin sweep*, no entanto se aplica a um corpo extenso nas suas três dimensões. O *inflation* pode ser entendido como a aplicação do método de varredura na superfície de um corpo 3D que se estende até uma pequena profundidade do mesmo, conforme exemplificado na Figura 6. A importância da aplicação de controles *inflation* nos domínios fluidos se deve à necessidade de se obter maior precisão no cálculo de gradientes na região próxima às interfaces do tipo sólido-fluido, o que leva a um cálculo mais preciso dos coeficientes convectivos para determinação dos fluxos de calor nas interfaces.

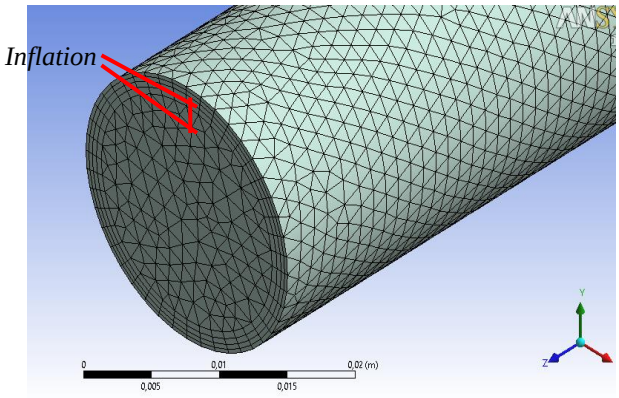


Figura 6. Ilustração do controle inflation no fluido interior do manifold

Na tabela II, são apresentados os principais resultados da estatística de geração da malha do coletor.

Tabela II. Estatística da geração de malha

Domínio	Número de nós	Número de elementos
Aletas	1.987.552	1.469.475
Tubos de elevação	790.384	592.326
Manifolds	257.324	192.357
Fluido de trabalho	1.827.433	3.170.380
Cobertura inferior e superior	762.432	567.840
Ar	4.372.516	5.212.932
Total	9.997.641	11.205.310

C. Configuração da simulação (Setup)

Após a geração da malha deve-se proceder para a configuração das características físicas de cada domínio, definição dos modelos matemáticos utilizados e condições iniciais e de contorno. Neste trabalho, como o estudo se restringe a condições de regime permanente, é necessário especificar apenas das condições de contorno. As principais configurações utilizadas estão resumidas na Tabela III. Detalhes sobre as características dos modelos k-épsilon de turbulência e P1 de radiação podem ser encontrados em [12] e [13], respectivamente.

Tabela III. Configurações principais da simulação

Domínios			
Fluido de trabalho	**Aletas**	**Espaçamento de ar**	**Cobertura**
Água	Alumínio	Ar	Vidro
Regime laminar	Fonte de radiação 408,4 W/m²	Regime turbulento	Temperatura ambiente 25°C
Paredes sem deslizamento	Superfície inferior adiabática	Modelo K-épsilon de turbulência	Coeficiente de perda de calor W/m²K
Vazão total 3,39 x 10^{-2} kg/s		Modelo P1 de radiação	
Temperatura de entrada 25°C			

O valor da fonte de calor imposta na superfície superior das aletas é resultado da radiação incidente pelo produto tau-alpha do coletor (transmissividade do vidro e absortividade da placa, respectivamente), sendo a transmissividade igual a 0,8, absortivida igual a 0,96 e a radiação solar incidente igual a 520W/m².

VI. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados da simulação do coletor em regime permanente, segundo as condições de operação apresentadas.

A temperatura de saída da água se manteve em 62,2°C, o que representa um ganho de energia do fluido de trabalho de 526W em relação ao estado de entrada.

A partir da temperatura de saída, a eficiência do coletor pode ser calculada por (7):

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_s - T_e)}{A \cdot G} \tag{7}$$

Onde,

η eficiência do coletor;

$\dot{m}$ vazão mássica de água [kg/s];

C_p calor específico da água, 4180 [J/kg.K];

T_s temperatura de saída da água [K];

T_e temperatura de entrada da água [K];

A área externa do coletor [m²];

G radiação incidente [W/m²].

A eficiência do coletor nestas condições foi, portanto, calculada em 75,4%.

O valor médio da temperatura da placa absorvedora foi de 74,3°C, enquanto a temperatura da superfície superior da cobertura foi 54,5°C.

Aspectos também relevantes a serem analisados são o perfil de vazão nos tubos de elevação e o perfil de temperatura na placa absorvedora. A Figura 7 apresenta um gráfico do perfil de vazão em ao longo dos tubos de elevação.

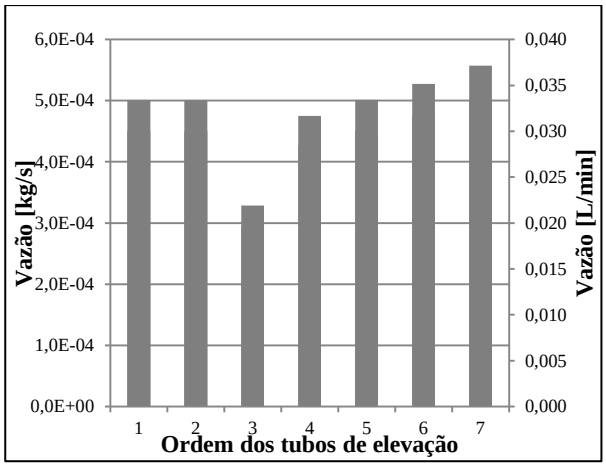


Figura 7. Perfil de vazão ao longo dos tubos de elevação.

O perfil de vazão, observado na Figura 7, apresenta uma distribuição não uniforme, com menor valor de vazão nos tubos centrais, coerente com o trabalho desenvolvido em [11]. Devido à menor taxa de escoamento nos tubos intermediários, pode-se deduzir que a temperatura nas aletas intermediárias seja superior à temperatura das laterais devido à menor taxa de retirada de calor. Este comportamento é confirmado pela Figura 8, na qual é apresentado o perfil de temperatura da placa absorvedora.

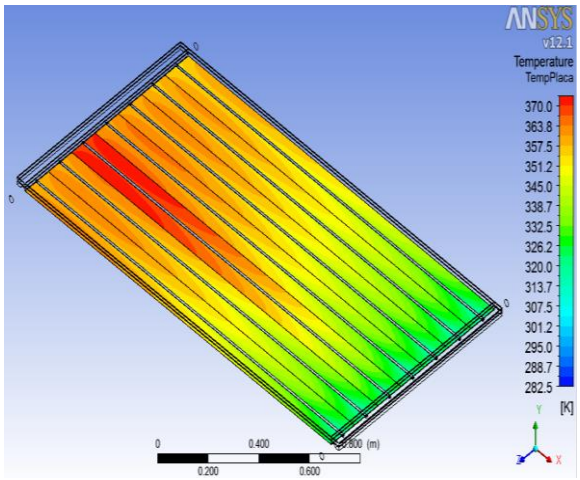


Figura 8. Perfil de temperatura na placa absorvedora.

Quanto maior a temperatura da placa absorvedora, maior as perdas térmicas para o ambiente, reduzindo a eficiência. Por esta razão torna-se importante a analise do perfil de temperatura da placa e de vazão nos tubos, bem como medidas para maximizar a eficiência térmica explorando o fenômeno da não uniformidade do perfil de escoamento, cujo aspecto será foco de aprofundamento de pesquisa nas próximas etapas do P&D 438.

Em relação ao valor de eficiência obtido nesta simulação, de 75,4%, os ensaios laboratoriais, utilizando a norma ABNT NBR 15.747-2, do primeiro protótipo construído do coletor, que resultou em uma média de 67% nas mesmas condições operativas, inicialmente demonstra um desvio de 8,4 pontos percentuais. Esta diferença de resultados pode ser atribuída principalmente a imprecisões no modelo e nas condições de contorno utilizadas, como o valor do coeficiente de perdas térmicas pelo topo do coletor de 2,75W/m²K, calculado utilizando equações clássicas da transferência de calor.

Outras variáveis importantes no cálculo da eficiência são os parâmetros *Tau* e *alpha*, neste trabalho foram admitidos como 0,81 e 0,96, respectivamente, baseado em dados típicos, porém, até este ponto da pesquisa, não foram realizadas medições destas propriedades, o que levaria a uma melhor representação matemática do protótipo construído.

VII. Conclusões

O desenvolvimento de coletores solares de placa plana mais eficientes possui grande potencial de aplicação em sistemas de refrigeração solar, que por sua vez pode aliviar picos de energia do sistema elétrico devido a cargas de equipamentos de ar condicionado.

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um modelo de simulação de coletores solares, que antecede a construção de protótipos, oferecendo vias de análises fluidodinâmicas que permitem uma determinação prévia do desempenho térmico dos equipamentos.

Foi utilizado o método dos volumes finitos, através do software Ansys CFX. O modelo utilizado se mostrou uma ferramenta adequada para a previsão do desempenho térmico global do coletor, bem como para avaliação de fenômenos termofluidodinâmicos localizados, apesar de ser ainda necessária a realização de alguns ajustes e calibração do modelo.

Foram apresentados os perfis de escoamento nos tubos de elevação e temperatura na placa absorvedora, cujo impacto na eficiência térmica será avaliado nas próximas etapas da pesquisa.

VIII. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Minas Gerais e o Departamento de Engenharia Mecânica pela disponibilização dos computadores e softwares para realização deste trabalho.

IX. Referências Bibliográficas

Periódicos:

[1] D. Carbonell, J. Cadafalch, R. Consul. Dynamic Modelling of Flat Plate Solar Collectors. Analysis and Validation Under Thermosyphon Conditions. Solar Energy, Vol. 89 Pp. 100–112, 2013.

[2] E. Zambolin, Col, D. Del. Experimental Analysis of Thermal Performance of Flat Plate and Evacuated Tube Solar Collectors in Stationary Standard and Daily Conditions. Solar Energy. Vol. 84, Pp. 1382–1396, 2010.

[3] N. Akhtar, S. C. Mullick. Computation of Glass-Cover Temperatures and Top Heat Loss Coefficient of Flat-Plate Solar Collectors With Double Glazing. Energy, Vol. 32. Pp. 1067–1074, 2007.

[4] R. H. Martín, J. Pérez-García, A. García, F. J. García-Soto, E. López-Galiana. Simulation of an Enhanced Flat-Plate Solar Liquid Collector With Wire-Coil Insert Devices. Solar Energy. Vol. 85, Pp. 455–469, 2011.

[5] A. Subiantoro, O. K. Tiow. Analytical Models for the Computation and Optimization of Single and Double Glazing Flat Plate Solar Collectors With Normal and Small Air Gap Spacing. Applied Energy. Vol. 104, Pp. 392–399, 2013.

[6] V. Badesc. Optimal Control Of Flow in Solar Collectors for Maximum Exergy Extraction. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 50, Pp. 4311–4322, 2007.

[7] S. Farahat, F. Sarhaddi, H. Ajam. Exergetic Optimization of Flat Plate Solar Collectors. Renewable Energy. Vol. 34. Pp. 1169–1174. 2009.
[8] S. A. Kalogirou. Prediction of Flat-Plate Collector Performance Parameters Using Artificial Neural Networks. Solar Energy. Vol. 80 Pp. 248–259, 2006.
[9] M. Badache, D. R. Rousse, S. Hallé, G. Quesada. Experimental and Numerical Simulation of a Two-Dimensional Unglazed Transpired Solar Air Collector. Solar Energy, Vol. 93. Pp. 209–219, 2013.
[10] N. M. Villar, J. M. C. López, F. D. Muñoz, E. R. García, A. C. Andrés. Numerical 3-D Heat Flux Simulations on Flat Plate Solar Collectors. Solar Energy. Vol. 83, Pp. 1086–1092. 2009.

Dissertações e Teses:

[11] R. C. Menezes, E. M. D. Pereira, R. Huebner. Análise Numérica e Experimental do Escoamento Interno em um Coletor Solar Plano. Belo Horizonte, 2008.

Livros:

[12] M. Modest. Radiative Heat Transfer 2nd ed. Academic Press, Pp 472-478, 2003.
[13] H. K. Versteeg, W. Malalasekera. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method 2nd ed. Pearson Prentice Hall, Pp 72-79, 2007.