

FLÁVIO BRÉGLIA SALES

ANÁLISE DE COLETORES SOLARES COM ARMAZENADORES INTEGRADOS
BASEADO NA GEOMETRIA CUBÓIDE UTILIZANDO CFD

Bauru 2012

FLÁVIO BRÉGLIA SALES

ANÁLISE DE COLETORES SOLARES COM ARMAZENADORES INTEGRADOS
BASEADO NA GEOMETRIA CUBÓIDE UTILIZANDO CFD

*Dissertação apresentada à
Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Neto para obtenção do
Título de Mestre em Engenharia*

Área de concentração:
Fenômenos de Transporte

Orientador:
Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon

Bauru 2012

Sales, Flávio Brégia.

Análise de coletores solares com armazenadores
integrados baseado na geometria cubóide utilizando CFD
/ Flávio Brégia Sales, 2012
53 f.

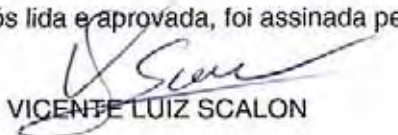
Orientador: Vicente Luiz Scalon

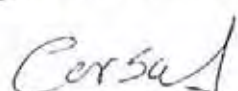
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012

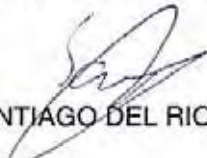
1. Coletor solar. 2. ICS cubóide. 3. CFD. I.
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE FLÁVIO BRÉGLIA SALES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 13 dias do mês de julho do ano de 2012, às 09:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. CARLOS TEÓFILO SALINAS SEDANO do(a) Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos / Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, Prof. Dr. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de FLÁVIO BRÉGLIA SALES, intitulado "ANÁLISE DE COLETORES SOLARES COM ARMAZENADORES INTEGRADOS BASEADO NA GEOMETRIA CUBÓIDE UTILIZANDO CFD". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON


Prof. Dr. CARLOS TEÓFILO SALINAS SEDANO


Prof. Dr. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA

A toda minha família,
amigos, orientadores
e a Deus com muito
carinho.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por me acompanhar em todos os momentos, sendo minha motivação, meu suporte e força.

Aos amigos e orientadores Prof. Vicente Luiz Scalon e Prof Alcides Padilha pela amizade, diretrizes seguras, confiança e motivação sem as quais esse trabalho não se realizaria.

À GENERAL MOTORS DO BRASIL, representada pelos gerentes do departamento de Cálculo Estrutural - CAE da Engenharia do Produto, Engenheiro Roberto Pereira Ramos, Engenheiro Eduardo Almeida e Engenheiro Attila Budavari pela oportunidade de desenvolver um trabalho de pesquisa e pelo apoio que me possibilitou concluir o mestrado paralelamente às atividades da empresa.

Aos amigos do Departamento de simulações e análises virtuais, Nelson Quim, Filipe Fabian Buscariolo, Leonardo José Della Volpe e Danilo Alcântara de Oliveira pelas contribuições que ajudaram no enriquecimento deste trabalho.

Aos meus pais, Gilmar e Ana Lúcia, minha irmã Francine, minha avó Ignez pelo apoio em todos os momentos e por viabilizarem desde a graduação a realização deste trabalho. Além disso, minha namorada Lilian, pelo companheirismo, compreensão e suporte nos momentos difíceis.

À toda minha família, principalmente meu tio João Antônio, que sempre me deu apoio e motivação para a conclusão desse trabalho.

À UNESP – Universidade Estadual Paulista por continuar me oferecendo e transmitindo conhecimento desde a graduação.

À todos que direta ou indiretamente participaram da execução deste trabalho

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iii
SIMBOLOGIA [SI].....	ix
Símbolos Romanos.....	ix
Símbolos Gregos	xi
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
I INTRODUÇÃO.....	1
II OBJETIVOS.....	6
III REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
III.1-Soluções numéricas para problemas em Engenharia.....	8
III.1.1 Histórico Resumido.....	9
III.1.2 Códigos CFD.....	10
III.2-Tipos de sistema de aquecimento solar.....	10
III.2.1 Coletores solares sem concentração.....	12
III.2.2 Coletores Solares com concentração.....	13
III.2.3 Estado da arte sobre coletores solares.....	16
IV Modelo Numérico.....	20
IV.1-Equações de Navier-Stokes.....	20
IV.2-Métodos numéricos e suas aplicações.....	22
IV.2.1 Equações Aproximadas na Forma Linear.....	26
IV.2.2 Acoplamento Pressão-Velocidade.....	26
IV.3-Método de Geração de Malha.....	29
IV.3.1 Malha Superficial Bidimensional.....	29
IV.4-Geometrias, malhas e modelo computacional utilizados na solução.....	31
IV.4.1 Malha e condições de contorno.....	33
IV.4.2 Cálculo do coeficiente de estratificação térmica.....	35

V Resultados e Discussões.....	36
V.1-Validação da malha utilizada.....	36
V.2-Estudo da temperatura máxima em cada geometria após o aquecimento.....	37
V.3-Estudo da temperatura máxima em cada geometria após o resfriamento.....	42
V.4-Análise do comportamento transiente das temperaturas máximas e mínimas e do fator de estratificação.....	45
VI Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros.....	50
Bibliografia.....	52

Lista de Figuras

Figura 1: Coletor solar concentrador.	3
Figura 2: Coletor solar sem concentração do tipo placa plana com reservatório separado.	4
Figura 3: Esquema do cubóide com as condições estabelecidas.....	6
Figura 4: Linhas de Fluxo, em torno de um carro de Fórmula 1, calculadas por software de CFD.....	9
Figura 5: Esquema de funcionamento de um coletor solar típico.....	11
Figura 6: Coletor solar de placa plana.....	12
Figura 7: Coletor solar cilindro-parabólico.....	14
Figura 8: Coletor solar parabólico tipo “prato”.....	15
Figura 9: Sistema solar concentrador do tipo “Torre Central”.....	15
Figura 10: Sistemas de fogão e forno solar.....	16
Figura 11: Volume de Controle representativo da discretização das equações do transporte escalar.....	25
Figura 12: Algoritmo do Método de Solução Segregado.....	27
Figura 13: Etapas de geração de malha 2D pelo algoritmo “Advancing Front”.....	30
Figura 14: Técnica de criação do novo elemento.....	30
Figura 15: Determinação do ângulo de distorção “skew”.....	31
Figura 16: Geometrias tipo cubóide de mesmo volume utilizadas nas simulações.....	32
Figura 17: Geometrias tipo cubóide de diferentes volumes.....	33
Figura 18: Esquema da malha utilizada na discretização.....	34
Figura 19: Estudo de validação de malha.....	37
Figura 20: Temperatura máxima plotada ao término do aquecimento para geometrias modificadas (parte 1).....	38
Figura 21: Temperatura máxima plotada ao término do aquecimento para geometrias modificadas (parte 2).....	39
Figura 22: Detalhes do perfil de velocidades ao final do carregamento.....	41
Figura 23: Temperatura máxima plotada ao término do resfriamento para geometrias	

modificadas (parte 1).....	43
Figura 24: Temperatura máxima plotada ao término do resfriamento para geometrias modificadas (parte 2).....	44
Figura 25: Detalhes do comportamento dos valores da função corrente ao final do processo de resfriamento.....	46
Figura 26: Comportamento da temperatura máxima no interior do domínio durante os processos de aquecimento e resfriamento.....	47
Figura 27: Comportamento da temperatura mínima no interior do domínio durante os processos de aquecimento e resfriamento.....	48
Figura 28: Comportamento do Fator de Estratificação(SF) durante os processos de aquecimento e resfriamento.....	49

Lista de tabelas

Tabela 1: Tipos de coletores solar e temperatura de operação	17
--	----

SIMBOLOGIA [SI]

Simbolos Romanos

A	área [m ²]
$a_{i,j}$	coeficientes lineares convectivos
C_a	constante
cp	calor específico [kJ/kg K]
D	diâmetro [m]
d_f	função da razão da área pelo coeficiente $a_{i,j}$
E	energia [J]
E_w	parâmetro de rugosidade da parede [J]
e_{ij}	componente da deformação cisalhante
F	força [N]
h	entalpia [kJ/kg]
J_f	função de fluxo de massa [kg/s m ²]
K_i	função de permeabilidade
K_t	coeficiente de transferência de calor total
$\dot{m}$	vazão mássica [kg/s]
N_s	número de divisões
p	pressão [Pa]
$\bar{p}$	pressão média [Pa]

p'	flutuação da pressão [Pa]
R	raio [m]
S	fonte de energia
T	temperatura [K]
T_{celula}	temperatura da célula [K]
t	tempo [s]
U	velocidade [m/s]
U_c	velocidade característica [m/s]
u	componente da velocidade na direção x [m/s]
u_r	velocidade relativa entre o fluido e a velocidade do sistema de coordenadas [m/s]
u'	flutuação da velocidade na direção x [m/s]
$\bar{u}$	velocidade média na direção x [m/s]
$\bar{u}_r$	campo de velocidade relativa média [m/s]
$\overline{u_r'}$	flutuação do campo de velocidade relativa [m/s]
u_τ	velocidade de atrito na parede [m/s]
V	volume [m ³]
v	componente da velocidade na direção y [m/s]
$\bar{v}$	velocidade média na direção y [m/s]
v'	flutuação da velocidade na direção y [m/s]
w	componente da velocidade na direção z [m/s]
w'	flutuação da velocidade na direção z [m/s]
$\bar{w}$	velocidade média na direção z [m/s]

Símbolos Gregos

α	coeficiente de perda de carga inercial
β	coeficiente de perda de carga viscosa
Δp	variação de pressão [Pa]
Δs	variação do deslocamento [m]
Δt	variação do tempo [s]
δ	distância entre os pontos nodais de um elemento triangular
δ_m	comprimento mínimo de um elemento triangular
Φ	função de dissipação das tensões viscosa [W]
ϕ	grandeza escalar
ϕ'	flutuação da grandeza escalar
$\bar{\phi}$	grandeza escalar média
γ	coeficiente de velocidade
Γ	coeficiente de difusividade
Λ_s	perímetro e uma superfície
μ	viscosidade dinâmica [N s/m ²]
μ_t	viscosidade turbulenta [N s/m ²]
ν	viscosidade cinemática [m ² /s]
v	escala de velocidade
ρ	densidade [kg/m ³]
τ_{ij}	componentes do tensor de tensões [N/m ²]
τ_w	tensão de cisalhamento na parede [N/m ²]
u	velocidade superficial [m/s]
ψ	coeficiente de pressão

Lista de Abreviaturas e Siglas

CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CFD	Computacional Fluid Dynamics
GM	General Motors
GMB	General Motors do Brasil
HPC	High Performance Computing
MEF	Método de Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
NS	Navier Stokes
SIMPLE	Semi-Implicity Method for Pressure-Linked Equation
UDF	User Defined Functions
UG	Unigraphics
2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões

RESUMO

As discussões recentes sobre sustentabilidade tem destacado os sistemas de aquecimento solar como alternativa adequada para aquecimento de água. Estes sistemas tem ganho notoriedade tanto para uso doméstico como no aquecimento de piscinas. Um dos aspectos que é frequentemente destacado como principal dificuldade para a sua popularização, entretanto é o custo de sua implantação. Uma das formas de reduzir este custo é minimizando o número de componentes e simplificando o sistema. Nesta linha de desenvolvimento muito tem se discutido sobre o uso de sistemas integrados coletor-armazenador (ICS). Baseando-se nestas avaliações, este trabalho pretende estudar diferentes configurações geométricas de coletores solares com armazenador integrado do tipo cubóide e verificar a influência sobre o aproveitamento de energia térmica quando se utiliza diferentes dispositivos para direcionar o fluxo de água quente. A partir de simulações numérico-computacionais é possível identificar as geometrias que apresentam melhor estratificação térmica no armazenador. A estratificação da temperatura em um armazenador é um fator extremamente importante no estudo de coletores solares, pois determina a porção de temperatura mais elevada. O modelo base, validado experimentalmente na literatura, foi utilizado com condições de fluxos de calor incidente e de perda por resfriamento constantes com boa concordância de resultados. Modificações geométricas foram implementadas e avaliadas para otimizar os parâmetros de projeto deste tipo de coletores solares integrados. Outras análises alterando o volume do sistema coletor-armazenador foram realizadas: um com 200 litros de capacidade e outro com 300 litros, de maneira a estabelecer um tamanho ótimo do sistema. Para visualizar a estratificação do armazenador, imagens com o perfil de temperatura são apresentadas ao final do aquecimento e posteriormente ao resfriamento e também gráficos demonstram o coeficiente de estratificação. Após a análise desses resultados verificou-se uma melhora no coeficiente de estratificação e também um aumento na quantidade de água quente durante o aquecimento um dos sistemas modificados, em relação ao usado como base. Cumpre ressaltar ainda que as modificações realizadas permitem reduzir a perda de calor no período noturno com a introdução de um diodo térmico, já que nessas geometrias modificadas ocorre a separação das correntes quente e fria.

ABSTRACT

Recent discussions have highlighted the sustainability of solar heating systems as an appropriate alternative for heating water. These systems has gained prominence for both household and swimming pool heating. One aspect that is often highlighted as the main obstacle to its popularity is the cost of its implementation. One way to reduce this cost is to minimize the number of components and simplifying the system. In this field of development has long been discussed about the use of integrated collector-storage (ICS). Based on these evaluations, this work analyzes different geometrical configurations of integrated solar collector-storage with storage type cuboid and the influence on the use of thermal energy when you use different devices to direct the flow of hot water. From numerical-computational simulations, the geometry with better thermal stratification in the storage can be identified. The stratification of temperature in a storage is an extremely important factor in the study of solar collectors, because it determines the portion of higher temperature. The base model, experimentally validated in the literature, was used with constant conditions of incident heat flux and heat loss for cooling. Geometric changes were implemented and evaluated to optimize the design parameters of this type of integrated solar collectors. Further analysis by changing the volume of the collector-storage system were carried out: a 200 liter capacity and another with 300 liters, in order to establish an optimum size of the system. To view the stratification of the storage, images with the temperature profile are shown at the end of the heating and cooling periods and the following graphics show the stratification coefficient. The CFD method allowed to obtain results with good agreement with those used as the basis from the literature. Results indicate an improvement in the stratification coefficient and an increase in the amount of hot water for heating period, in the modified systems comparing with baseline from the literature. Through modifications presented, an important way to reduce heat loss during the night can now be made, which is the introduction of a thermal diode, as these modified geometry have separation of hot and cold streams.

I INTRODUÇÃO

Os grandes avanços no desenvolvimento da humanidade estiveram historicamente associados ao aumento de sua capacidade de produzir energia ou ao desenvolvimento de novas tecnologias que permitam o seu uso com maior eficiência. Exemplos disto são largamente vistos desde a nossa pré-história. Apenas para citar alguns dos mais importantes eventos desta história: o domínio do fogo, a utilização da força animal, a capacidade de produzir trabalho a partir da energia térmica impulsionaram intensamente o conhecimento e melhores condições de vida. Este último inclusive propiciou a “Revolução Industrial” que representa o grande salto no desenvolvimento da humanidade nos últimos séculos.

Este grande desenvolvimento fez com que fontes de energia fossem pesquisadas em todas as suas possibilidades. Tanto que, no final do século XI aparecem importantes estudos para utilização da energia solar para aquecimento e geração de potência. Entretanto, o elevado custo para a exploração das fontes alternativas de energia em relação aos combustíveis fósseis, fez com que a maioria destes estudos fossem abandonados, tornando petróleo e carvão mineral as principais fontes de energia do século XX.

O acelerado processo de desenvolvimento teve como um de seus grandes problemas a Primeira Crise do Petróleo, ocorrida no início dos anos 70 quando acreditou-se que o petróleo – principal fonte de energia mundial – estivesse a beira de um esgotamento completo. Em função disto, houve um grande aumento de seu preço e como consequência o aumento do custo da energia, tornando viável a exploração das fontes alternativas de energia que estavam até então em segundo plano.

Entretanto, este processo não surtiu o efeito esperado pois antes do desenvolvimento de fontes alternativas, foram descobertas um grande número de novas jazidas de petróleo que postergou os horizontes de seu esgotamento. Este fato,

provocou uma considerável redução nos preços do petróleo que, por sua vez, desestimularam o desenvolvimento de novas tecnologias. Apesar disto, pouco tempo depois, um novo problema relacionado ao desenvolvimento e utilização de recursos não renováveis começa a aparecer: a questão ambiental.

Embora uma série de problemas tenham sido relatados em função do acelerado desenvolvimento e utilização dos recursos naturais, como problemas com a camada de ozônio e outros, a grande questão que se coloca na atualidade é o chamado “Efeito Estufa” associado a emissão de Dióxido de Carbono e alguns outros gases para a atmosfera. A identificação do problema é antiga, mas o seu marco inicial, que serviu para chamar a atenção da sociedade para o problema, pode ser definido como a primeira conferência sobre o clima organizada pela *World Meteorological Organization (WMO)* em 1979. A partir daí uma série de levantamentos foram feitos com novos indicativos do problema e que levaram a ONU a montar o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Changes – IPCC*) e tentar através de protocolos regulamentar uma solução para o problema como destacado por IPCC Secretariat (2004).

Os estudos realizados mostraram que uma série de fatores contribuíram para o “Efeito Estufa”, um dos principais é a queima de combustíveis fósseis. Tanto assim que o Protocolo de Kyoto estabeleceu um sistema de créditos carbono em que os países que emitem grandes volumes de carbono para a atmosfera devem encontrar meios ou financiar projetos para fixá-los novamente. Como a queima de combustíveis fósseis está associada a utilização de reservas de carbono que se encontram fixadas há muito tempo isto implica no aumento significativo da concentração de carbono na atmosfera. Neste aspecto as fontes renováveis de energia apresentam seu mais importante diferencial: não usam reservatórios de carbono fixo. Energias eólica, solar e hidráulica não estão associadas diretamente à emissão de carbono e a biomassa, que apenas o emite durante o seu desenvolvimento para a atmosfera.

Assim sendo, a preocupação com as condições de vida do planeta nos últimos anos, impulsionou a utilização das fontes renováveis, mas muito ainda pode ser feito. O uso da energia do sol que chega a superfície da Terra representa um importante avanço no sentido de contribuir para a melhora da situação atual. Desta forma, um uso mais intenso de aquecimento solar reduziria, no caso do Brasil, o consumo de eletricidade e,

consequentemente, a dependência de gás natural – a fonte normalmente utilizada para complementar a produção de energia elétrica no país.

Atualmente existem diversos tipos de sistemas de captação de energia solar e as pesquisas têm se intensificado na redução de custos para implantação dos sistemas. Os coletores solares se dividem em dois grandes grupos: os coletores solares sem concentração e os coletores solares de concentração. Detalhes a respeito dos dispositivos podem ser encontrados em referência básicas sobre energia solar como Duffie e Beckman (2006), Kalogirou (2004) e Kalogirou (2009)

Os coletores solares de concentração podem elevar a temperatura a mais de 70°C , através de um método de concentração utilizando-se de métodos ópticos conforme Figura 1. São aplicados na energia solar térmica de média e alta temperatura.

Os coletores solares sem concentração não ultrapassam 70°C , são mais simples do que os de concentração, conforme visto na Figura 2 e utilizados geralmente para produção de água quente doméstica.

O foco do presente trabalho é o estudo de um tipo específico de coletor solar sem concentração, de placa plana, que possui o armazenador acoplado seguindo uma geometria denominada cubóide. Nesse coletor são estudadas variações geométricas para definir parâmetros otimizados no aproveitamento de energia. Essa otimização é avaliada



Fonte: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/P/AE_parabolic_trough_collector.html

Figura 1: Coletor solar concentrador.



Fonte: <http://aplicweb.feevale.br/site/files/documentos/pdf/23123.pdf>

Figura 2: Coletor solar sem concentração do tipo placa plana com reservatório separado.

a partir do perfil de temperatura do coletor após o período de aquecimento. Simulações para verificação do comportamento dos perfis transientes de temperaturas após o período de resfriamento também são analisadas. Por fim, com esses dados pode-se calcular um fator de estratificação do sistema.

Neste estudo são apresentadas seis diferentes variações de geometria: sistema com uma placa defletora, sistema com direcionador de fluxo, sistema com placa defletora e direcionador de fluxo, sistema com direcionador modificado, sistema com 200 litros de capacidade e sistema com 300 litros de capacidade.

A alternativa adotada no presente trabalho para comparação das geometrias é o uso de simulações numéricas que possibilitam testar diversas condições, virtualmente representadas, sem a necessidade da construção de um modelo físico para cada uma.

A escolha dessa alternativa está baseada na atual tendência dirigida para o uso de ferramentas do tipo CAE – *Computer Aided Engineering*, que têm mostrado um menor custo e também um menor tempo de resposta na análise de propostas. Outro fator importante para essa escolha é a evolução comercial dos códigos, que atualmente possuem uma interface bem mais amigável com o usuário. Os softwares de CAE utilizados em dinâmica dos fluidos são denominados de CFD – *Computational Fluid Dynamics* e oferecem bons resultados em termos de confiabilidade para uma gama extensa de casos

de escoamento de fluidos em sistemas fechados, ao redor de corpos, sistemas bifásicos complexos, análises térmicas com troca de calor, dentre outras. Os mais utilizados são: FLUENT®, CFX® e Star-CD.

Essa dissertação está organizada apresentando inicialmente um capítulo introdutório ao tema proposto mostrando coletores solares e o conceito de simulação numérica. Em seguida, os objetivos e os tópicos de estudo desse trabalho, um capítulo com uma revisão bibliográfica apresentando trabalhos anteriores utilizando coletores solares e CFD. Um capítulo para apresentar a base dos códigos de CFD, ou seja, equações utilizadas para descrever os fenômenos da fluidodinâmica Seguidos pela metodologia que será apresentada com todas as condições de contorno, simplificações do método. Os resultados e discussões são os próximos à serem apresentados e, para finalizar, as conclusões obtidas através das análises dos resultados.

II OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a influência de parâmetros geométricos de projeto no aproveitamento energético de coletores solares com armazenador integrado. Para esse estudo é necessário avaliar as interações do fluido com a geometria do sistema. São obtidos perfis de temperatura, campo de velocidades e a partir destes, o cálculo de um parâmetro de estratificação térmica do sistema.

As condições de aquecimento e resfriamento utilizadas foram previamente correlacionadas por um protótipo construído a partir de uma simulação. No presente estudo, foi construído o modelo validado previamente e os seus parâmetros foram utilizados para extrair os dados das geometrias propostas. Uma visão geral da geometria do problema e das condições à que está submetida podem ser vistas na Figura 3.

O estudo é realizado através de simulações numéricas para seis geometrias

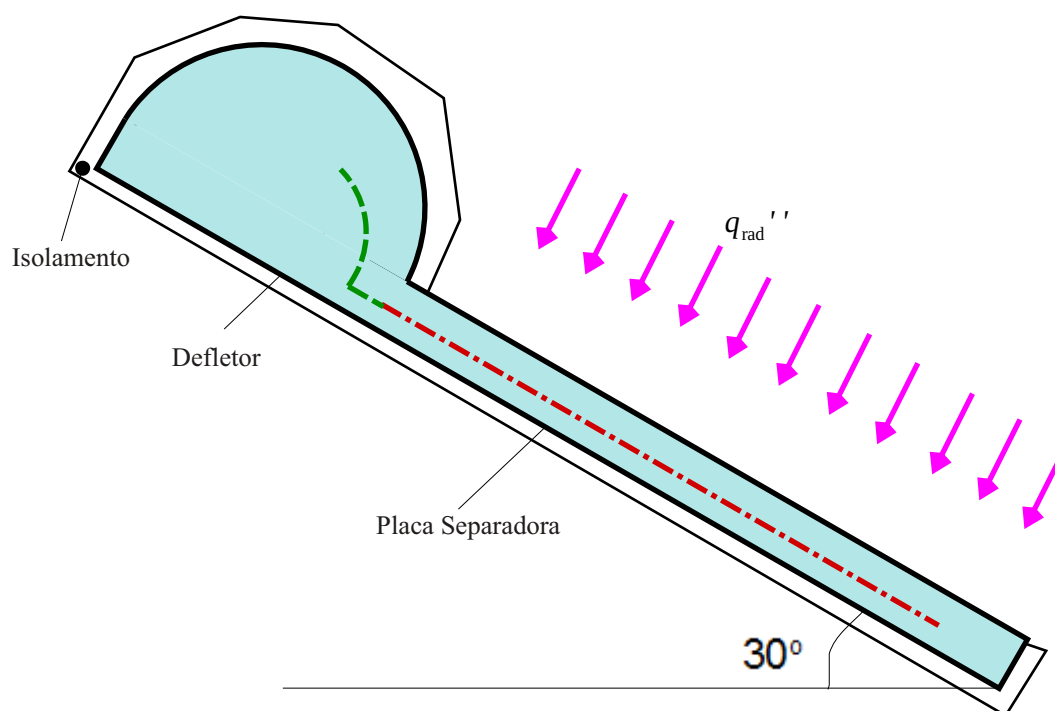


Figura 3: Esquema do cubóide com as condições estabelecidas.

distintas: o modelo base, validado com protótipo, um com placa defletora, um com direcionador de fluxo, um com placa defletora e direcionador de fluxo, um com direcionador de fluxo modificado, um com 200litros de capacidade e outro com 300litros, levando-se em conta que os demais possuem 120litros.

A condição de contorno utilizada foi baseada no trabalho de Sridhar e Reddy (2007) sendo considerado um fluxo constante de calor de 950W/m^2 por um período de 2 horas representando o aquecimento na superfície de captação solar. Para o resfriamento foi utilizado uma perda de calor de 40W/m^2 por uma hora, representando o período noturno também na superfície de captação solar. Portanto para a parede superior do coletor a condição utilizada para simulação foi:

$$\text{- Parede com fluxo de calor: } u=0; v=0; \begin{cases} q''=950\text{ W/m}^2 \text{ (aquecimento)} \\ q''=-20\text{ W/m}^2 \text{ (resfriamento)} \end{cases}$$

Para todos os casos, o fluxo de calor utilizado para aquecimento e a perda de calor no resfriamento foram os mesmos, bem como a angulação da placa coletora. As dimensões foram mantidas do modelo utilizado como base, exceto nos casos estudados com maior volume. As velocidades na parede são zero, condição implementadas com a condição de não deslizamento.

$$\text{- Superfícies adiabáticas: } u=0; v=0; q''=0\text{ W/m}^2$$

No presente trabalho, para a simulação das diferentes geometrias e parâmetros estudados foram utilizados o Hypermesh® para geração da malha bidimensional e FLUENT® para os cálculos de mecânica dos fluidos e, ainda, alguns pós processamentos apresentados foram realizados no Enight®, todos licenciados pela General Motors do Brasil. As simulações numéricas são feitas utilizando o software UG® para modelagem das superfícies e Hypermesh® para modelagem de elementos finitos (construção da malha), em seguida o software FLUENT® para o processamento numérico do escoamento do fluido no interior dos sistemas coletor-armazenador.

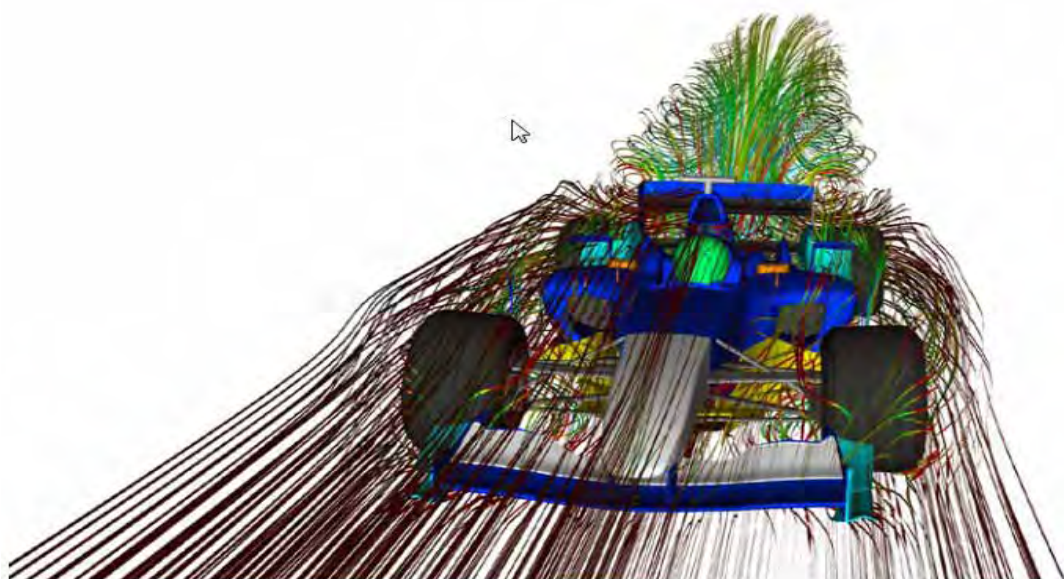
Como objetivo complementar desse trabalho avaliou-se a influência de diferentes tamanhos de malha sobre os valores obtidos para temperatura máxima durante o aquecimento e os respectivos tempos de processamento. O refinamento está relacionado com o dimensionamento dos elementos de malha utilizados para discretizar a geometria do sistema.

III REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conhecimento dos conceitos básicos sobre coletores solares é fundamental para a compreensão dos conceitos envolvidos neste trabalho. Para tanto estão apresentados uma série de trabalhos disponíveis na literatura envolvendo os principais tipos de coletores, com ênfase no tipo de coletor em estudo: coletor solar com armazenador integrado do tipo cubóide. Será mostrado um breve histórico sobre a evolução dos coletores solares.

III.1-Soluções numéricas para problemas em Engenharia

Os fenômenos de transporte são governados por equações diferenciais parciais e podem ser resolvidos de maneira analítica ou por métodos numéricos. Quando o grau de dificuldade permite a solução analítica, esse é o método selecionado. Porém, quando sua utilização não é viável, como no caso de geometrias complexas, os métodos numéricos são as ferramentas mais utilizadas para aproximação da solução. Este fato, aliado à facilidade de geração de diferentes estudos geométricos e de parâmetros para construções de modelos otimizados visando economia de tempo e dinheiro têm contribuído substancialmente para o aumento das simulações. Atualmente para solução numérica de problemas de fenômenos de transporte existe um campo de estudo específico chamado Dinâmica dos fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, ou ainda CFD). Dentre os vários métodos de aproximação utilizados para simulação, o Método dos Volumes Finitos (MVF) é o mais utilizado nos softwares comerciais e nos trabalhos recentes de CFD como Quim (2007) e Buscariolo (2009) destacando-se FLUENT, StarCD, UH3D, CFX entre outros. Um exemplo de aplicação destes pacotes sobre geometrias complexas pode ser visto na Figura 4.



Fonte: http://www.eng.fea.ru/FEA_news_457.html

Figura 4: Linhas de Fluxo, em torno de um carro de Fórmula 1, calculadas por software de CFD.

III.1.1 Histórico Resumido

A dinâmica dos fluidos computacional teve início com seus primeiros códigos em meados da década de 60, mas os primeiros resultados apresentavam ainda graves inconsistências com observações experimentais. Somente nos anos 70 os resultados mais próximos começaram a aparecer.

Entretanto, o início efetivo da aplicação desses *softwares* na indústria ocorreu nos anos 80, voltadas à problemas simples, sendo expandida nos anos 90 com a integração de softwares de engenharia como CAD e CAE.

Ainda na década de 80, de acordo com Quim (2007), as empresas automobilísticas e aeronáuticas, como GM, Mercedes, Boeing entre outras, desenvolviam métodos e softwares para obter numericamente propriedades dos fluidos. Esses métodos foram ultrapassados rapidamente e não possuíam uma boa precisão, tornando-os não muito confiáveis. A partir disso algumas companhias passaram a estabelecer parcerias com empresas que produziam códigos de CFD para desenvolverem módulos específicos aplicados à situações intrínsecas vivenciadas pelas companhias.

III.1.2 Códigos CFD

As simulações numéricas, quando utilizadas de maneira adequada, contribuem bastante para o desenvolvimento de veículos, aviões e novos produtos como coletores solares. Segundo Buscariolo (2009), as simulações permitem entender e investigar situações difíceis de serem testadas.

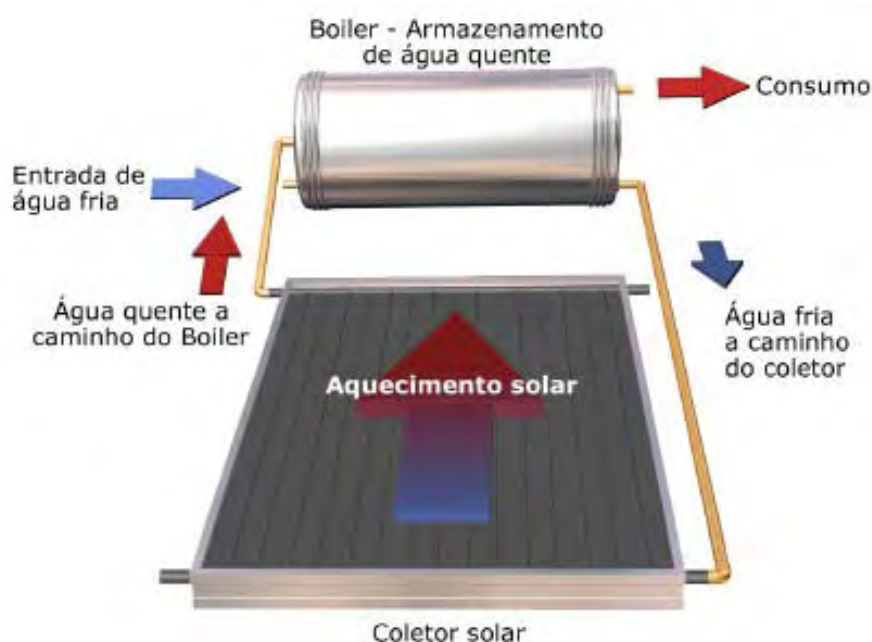
Os *softwares* de CFD em geral baseiam-se nas equações de Navier-Stokes. O FLUENT®, software utilizado nesse trabalho, resolve as equações de Navier-Stokes para regime turbulento ou laminar pelo método RANS (Reynolds-average Navier Stokes) que seriam as equações de Navier-Stokes aliadas às tensões médias de Reynolds. Ferziger e Perić (1996) descrevem o método RANS, como um método capaz de representar o comportamento turbulento de um fluido escoando, onde a média das equações de movimento no tempo, em uma determinada coordenada determinam as equações de movimento. O método necessita de aproximações obtidas através das equações dos modelos de turbulência para completar o sistema de equações.

Atualmente com a maior capacidade de processamento tornaram-se possíveis de serem realizadas em um tempo hábil relativamente curto, análises transientes com variação de densidade do fluido, como a presente neste trabalho. Este tempo é significativamente menor quando comparado com o necessário para a realização de um teste físico. Os supercomputadores trabalham com processamentos paralelos e são conhecidos pela sigla *HPCs*.

III.2-Tipos de sistema de aquecimento solar

Os sistemas de captação de energia solar utilizados no aquecimento de água são basicamente constituídos de um coletor solar, que capta a energia solar e transforma em energia térmica, um reservatório isolado termicamente que pode ser acoplado ao coletor ou não e as tubulações de alimentação e distribuição de água.

Segundo Bezerra (2011) o funcionamento dos sistemas de aquecimento solar é relativamente simples. A radiação emitida pelo sol atravessa o vidro do coletor e ao se encontrar com uma superfície, na maioria dos casos negra, parte da radiação é absorvida, parte é refletida pelo vidro e parte é reemitida, porém com seu comprimento de onda aumentado impossibilitando que ela atravesse novamente o vidro; assim cada

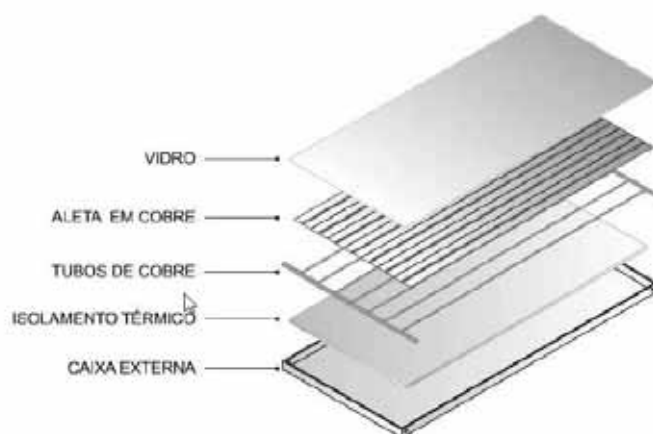


Fonte: <http://aplicweb.feevale.br/site/files/documentos/pdf/23123.pdf>

Figura 5: Esquema de funcionamento de um coletor solar típico.

uma porção cada vez menor é reemitida, causando o efeito que conhecemos como efeito serra.. Esse efeito também é conhecido como efeito estufa, o mesmo efeito que ocorre na Camada de Ozônio do planeta Terra e acaba por aquecer a superfície escura. Tubos paralelos ligados nas extremidades por tubulações de maior diâmetro contendo água estão em contato com a superfície negra. Assim, como os tubos contendo água estão em contatos com esta superfície, ambos são aquecidos e então, para sair do coletor e ir para o reservatório que está localizado na parte superior, o fluido se movimenta devido ao movimento de convecção natural, devido as diferenças de densidade da água, até que o equilíbrio térmico seja atingido. O sistema está ligado diretamente à uma caixa de água local, ou seja, assim que um volume de água quente é utilizado, igual volume de água fria é injetado no sistema para preencher o espaço vago. Um esquema típico deste funcionamento pode ser visto na Figura 5.

Um detalhamento maior deste sistema típico contendo inclusive os componentes internos pode ser visto na Figura 6. Embora sistemas deste tipo sejam os mais comumente encontrados, existem outros tipos de sistemas. Em função de suas características construtivas os sistemas de aquecimento solar, que serão detalhados nas seções posteriores, são divididos em dois grandes grupos:



Fonte: <http://aplicweb.feevale.br/site/files/documentos/pdf/23123.pdf>

Figura 6: Coletor solar de placa plana.

- Coletores solares sem concentração, que são coletores solares utilizados em aplicações de baixa temperatura, pois não ultrapassam 70°C, sendo utilizado em sua maioria para produção de água quente doméstica, conforme visto em Pereira et al. (2006).
- Coletores solares de concentração, que são coletores solares utilizados em aplicações de média e alta temperatura, pois utilizam métodos de concentração de óptica para elevar a temperatura do fluido a mais de 70°C. Segundo Pereira et al. (2006), exemplos desses coletores se encontram em centrais solares térmicas de Almería (Espanha), Grenoble (França) e na Califórnia (Estados Unidos). Maiores detalhes sobre aspectos construtivos e tipos de coletores solares que serão encontrados a seguir podem ser vistos em Wikipedia (2012).

III.2.1 Coletores solares sem concentração

Os coletores solares sem concentração, por não possuírem um sistema concentrador, possuem uma razão entre a superfície de absorção e a superfície do coletor de aproximadamente 1. Existe uma larga gama de coletores solares sem concentração e ao longo desta seção serão apresentadas as suas principais características.

O coletor solar de placa plana ou coletor reservatório recebe a energia emitida pelo sol, aquecendo uma placa e esse calor é transferido ao fluido. Em geral esses coletores possuem uma cobertura de vidro reproduzindo o efeito serra para aumentar a taxa de aquecimento.

Existe ainda uma variação do coletor solar de placa plana comum, que utiliza o ar e não água, porém possuem baixa capacidade térmica e o processo de transferência de calor entre placa e fluido é ineficiente. Entretanto, estes sistemas tem como vantagem o fato de não possuírem temperatura máxima limite, já que o ar sofre menor influência dos efeitos convectivos.

Ainda citando os coletores solares de placa plana, existe um tipo de coletor solar que possui o armazenador integrado, denominado ICSSWH – *Integrated Colector Storage Solar Water Heater* – que possui a placa para absorção da energia solar enquanto as outras paredes estão isoladas, incluindo a do armazenador. Estes coletores são construídos desta forma para se tentar minimizar os custos de instalação deste tipo de sistema.

Coletor solar do tipo tubos evacuados é um coletor constituído de dois tubos concêntricos onde o externo é construído de vidro e o interior é pintado de preto para aumentar a absorção. O fluido circula pelo tubo interno recebendo o calor absorvido. O anel externo formado entre o tubo interno e o tubo externo contém, normalmente, ar a uma baixa pressão e que justifica o seu nome de tubo evacuado.

Coletores solares dos tipos cônico ou esférico são coletores integrados ao armazenador, mas não possuem uma placa plana. Sua superfície de captação é, normalmente, cônica ou esférica com uma cobertura de vidro de mesma geometria. Dessa forma, a superfície atingida pelo sol permanece constante durante o dia. São coletores menores pois possuem uma pequena superfície de captação e são instalados facilmente devido a facilidade do sistema integrado.

III.2.2 Coletores Solares com concentração

São coletores que utilizam de métodos ópticos e sistemas mais complexos para aumentar a intensidade da radiação sobre a superfície absorvente, fazendo com que o fluido atinja temperaturas mais altas. O que torna o sistema complexo é a necessidade de um sistema auxiliar para que o coletor acompanhe o sol, ou seja, permaneça constantemente apontado em direção ao sol.

Coletor solar de concentração horizontal possui uma superfície refletora em formato, normalmente, cilindro parabólico. Esses espelhos concentram os raios solares em tubos



Fonte: <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/P/>

Figura 7: Coletor solar cilindro-parabólico.

receptores contendo um fluido de trabalho que, uma vez aquecido, pode ser utilizado em diversas aplicações. Uma amostra de um coletor deste tipo pode ser vista na Figura 7.

Coletor solar de concentração parabolóide tem uma superfície de reflexão similar à de uma antena parabólica típica. Os princípios de operação são os mesmos do coletor tipo cilindro-parabólico e depende de mecanismos similares, inclusive o sistema de acompanhamento do movimento do sol. Em função destas características, este tipo de sistemas com concentração só se justificam para utilização em elevadas temperaturas. Um esquema do concentrador parabólico pode ser visto na Figura 8.

Outro esquema de sistemas solares que se utilizam de concentração é o sistema conhecido como de “Torres Centrais”. Este sistemas consistem em uma série de grandes espelhos que se movem independentemente e acompanham o movimento solar. Os espelhos são dispostos em círculos, e arranjados de maneira a concentrar os raios solares em um receptor central, localizado no topo de uma torre central. São normalmente sistemas que operam a elevadas temperaturas e utilizados para gerar energia elétrica. Um esquema deste tipo de arranjo pode ser visto na Figura 9.

Além dos vários tipos de coletores citados, uma outra aplicação muito interessante de energia solar são os fogões e fornos solares. Eles desempenham um papel social extremamente relevante em comunidades onde a energia na forma de lenha ou petróleo é escassa e cara. Os fogões solares se caracterizam pela presença de concentradores



Fonte: <http://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals2/index.php>

Figura 8: Coletor solar parabólico tipo “prato”.

parabolóides, que concentram a energia para um ponto central, destinado ao cozimento de alimentos. Segundo os levantamentos disponíveis, o rendimento máximo dos fogões solares ocorre no período entre 9 e 15 horas embora isto também dependa do material do revestimento da parábola e do posicionamento da mesma em relação ao sol.

Essa aplicação, se bem desenvolvida, é extremamente vantajosa, pois além de



Fonte: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/P/AE_power_tower.html

Figura 9: Sistema solar concentrador do tipo “Torre Central”.

diminuir a poluição advinda da queima de combustíveis, utiliza uma fonte de energia gratuita e abundante. O forno solar têm o mesmo princípio e também apresenta as mesmas vantagens, sendo utilizado como forno no cozimento de alimentos. Uma amostra destes dispositivos podem ser vistos na Figura 10.

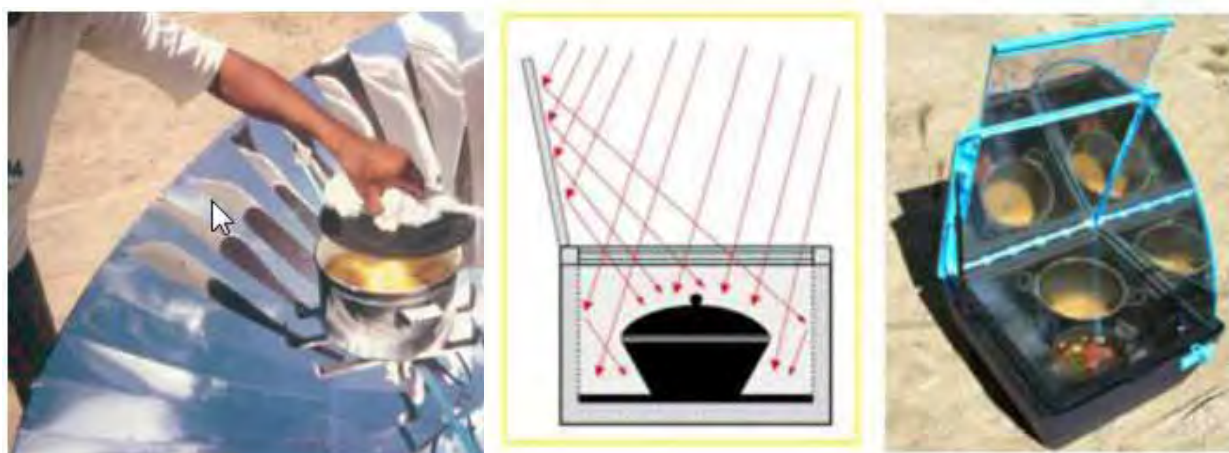
De maneira geral foi feita uma breve apresentação das principais aplicações de Energia Solar e suas características construtivas. A Tabela 1, apresenta parte destas características para alguns tipos de coletores solares e suas respectivas temperaturas de operação os fatores de concentração.

III.2.3 Estado da arte sobre coletores solares

Apesar do surgimento e comercialização de coletores solares ter se iniciado nos anos 70, foi a partir dos anos 90 que teve um impulso alimentado pela diversidade e melhoria na qualidade dos produtos disponíveis.

No Brasil, de acordo com Weiss et al. (2008), a área instalada de coletores solares é de $1,2\text{m}^2/100$ habitantes, sendo consideravelmente menor do que de alguns países como Israel $67,1\text{m}^2/100$ habitantes, Áustria $17,5\text{m}^2/100$ habitantes e China $3,2\text{m}^2/100$ habitantes.

Assim, conforme Pereira et al. (2006) existem instalados no Brasil, 250000 aquecedores solares, o que representa apenas 0,6% das residências, mostrando que esse mercado pode ser ainda muito explorado futuramente. Uma razão pela qual, países com menor insolação que o Brasil aproveitam melhor as vantagens do uso de



Fonte: <http://www.rc.unesp.br/showdefisica/ensino/CelulasSolares.pdf>

Figura 10: Sistemas de fogão e forno solar.

Tabela 1: Tipos de coletores solar e temperatura de operação .

Tipo	Fator de concentração	Temperatura de operação típica [°C]
Tanque receptor solar	1	30-70
Coletor sem cobertura (placa plana, plástico)	1	40
Coletor de placa plana metálico com cobertura	1	60-120
Concentrador fixo	3-5	100-150
Tubo evacuado	1	50-180
Parabólico composto [com tracking em 1 eixo]	1-5 [5-15]	70-240 [70-290]
Parabólico de passagem	10-50	150-350
Refrator fresnel	10-40	70-270
Refletor prato esférico	100-300	70-730
Refletor prato parabólico	200-500	250-700
Receptor central	500-3000	500-1000

Fonte: <http://aplicweb.feevale.br/site/files/documentos/pdf/23123.pdf>

aquecedores solares é de ordem legal. Em Barcelona, uma legislação foi implantada em julho de 2000 exigiu que pelo menos 60% das necessidades anuais de água quente de novas edificações ou em reforma fossem supridas pelo aquecimento solar. Além desse incentivo, outras medidas vêm sendo tomadas para o aumento da utilização de coletores solares. No presente estudo, veremos com maior profundidade o desenvolvimento dos coletores solares integrados, principalmente o de geometria cubóide.

Tripanagnostopoulos e Yianoulis (1996) utilizaram para uma abordagem diferente, também buscando uma melhoria do conjunto. Eles desenvolveram um coletor solar com espelhos simétricos e assimétricos denominado sistema CPC otimizando o conjunto óptico para aumentar a absorção da radiação solar.

Muito da pesquisa recente abordando energia solar tem sido direcionada para a diminuição dos custos de implantação dos equipamentos utilizados. Smyth et al. (2003) mostram o histórico da evolução do sistema com coletor/armazenador integrado (ICS – Integrated Collector Storage), uma das formas de aproveitamento energético solar considerada alternativa para esta redução de custo. Assim, essas concepções do sistema com coletor/armazenador integrado desenvolvidas, demonstraram resultados satisfatórios

quanto ao menor custo de acordo com Kalogirou (1997) e sua proposta de projeto e construção de um modelo de ICS.

As vantagens da utilização dos coletores integrados foram ressaltadas por diversos autores principalmente no que se refere à redução de componentes e tubos de conexão e a simplicidade. Entretanto um problema comumente destacado era a presença da circulação reversa durante o período noturno. Mohamad (1997) aperfeiçoou o modelo, incluindo entre o sistema de armazenamento e captação um diodo térmico, a fim de evitar a circulação reversa no período noturno. A avaliação da capacidade do sistema foi feita a partir de um modelo matemático e mostrou um aumento no armazenamento de energia no período considerado. Construído um protótipo de ICS, este demonstrou uma eficiência comparável aos sistemas de aquecimento convencionais.

Um outro trabalho que demonstrou o menor custo do sistema ICS foi apresentado por Chaurasia e Twidell (2001), sendo sugerido principalmente para aplicações domésticas. Partindo da idéia de que o sistema ICS era mais barato, um maior número de estudos foram feitos para o aperfeiçoamento do sistema. Foi visto ainda, neste trabalho, que a grande limitação para o rendimento desse sistema ICS era a perda de calor do fluido no período noturno, tornando necessário cobrir o tanque de armazenamento com um material isolante extra. Dessa forma, os autores decidiram comprar dois modelos de ICS com materiais isolantes diferentes, verificando que o material transparente era mais eficiente.

Seguindo ainda essa linha de melhorias nos sistemas, foram desenvolvidos revestimentos internos para se obter uma maior retenção do calor coletado, baseados em trabalhos de Smyth et al. (1999). A idéia de se colocar um revestimento no sistema foi fortalecida com as mudanças nas geometrias do revestimento segundo Smyth et al. (2003), buscando uma otimização desse novo sistema, capaz de reter o calor armazenado por períodos maiores.

Seguindo a linha de modificações em geometrias, Mohsen e Akash (2002), obtiveram um aumento na eficiência de 50% para 59 % devido a inclusão de aletas na placa absorvedora, no lado da água.

Analisando sistema do tipo cubóide (flat-plate) Kaushika e Reddy (1999) forneceram subsídios para que Sridhar e Reddy (2007) realizassem uma análise transiente dessa

mesma geometria. Estes trabalhos demonstraram a variação do coeficiente de troca de calor e o fator de estratificação da temperatura em função das mudanças na inclinação do sistema e da profundidade do cubóide, avaliando sua influência na quantidade de calor perdida pelo sistema.

Gertzos et al. (2008) estudou e analisou um sistema ICS com trocadores de calor utilizados para aquecer a água em circulação como alternativa para baratear também os custos de ICS. Em outro artigo, Gertzos e Caouris (2008) mostraram o melhor arranjo desse sistema com trocadores de calor. Outro ponto importante deste trabalho foi a validação de seu modelo numérico CFD em relação ao protótipo construído, mostrando boa precisão do método computacional.

Seguindo a linha dos diversos autores mostrados, o presente trabalho busca avaliar o comportamento de coletores solares do tipo cubóide, que possui armazenador integrado com alterações geométricas e de forma. Foi verificado o comportamento do sistema para diferentes mudanças em sua geometria com a inclusão de componentes indutores de deslocamento em seu interior. Também foram avaliados os efeitos da mudança de volume no de armazenamento de água no interior do cubóide.

IV Modelo Numérico

Para a realização desse trabalho, alguns conceitos de dinâmica dos fluidos são necessários para que se utilize de maneira adequada o software e possa se realizar a interpretação dos resultados. Este capítulo apresentará os mesmos de maneira sucinta.

O escoamento de um fluido está diretamente relacionado à forças inerciais (gradiente de pressão, efeitos gravitacionais) e forças viscosas (tensão de cisalhamento de fluido, rotação e tensão superficial). A dificuldade encontrada pelos modelos matemáticos consiste em representar os problemas envolvendo o escoamento dos fluidos. Conforme Sridhar (2007) o escoamento de fluidos em um coletor solar do tipo cubóide é laminar, eliminando a necessidade de escolha de um modelo de turbulência. Na análise de parâmetros de projeto para coletores solares do tipo cubóide, as equações que regem o escoamento serão resolvidas pelo software FLUENT®.

IV.1-Equações de Navier-Stokes

A partir de uma partícula fluida elementar, ignorando-se sua estrutura e seu movimento molecular, desenvolve-se as equações de quantidade de movimento, massa e conservação de energia. Detalhes deste tipo de abordagem utilizando o método de volumes finitos podem ser vastamente encontradas na literatura. A formulação apresentada a seguir é baseado na referência Versteeg e Malalasekera (2007). Baseado nestes princípios, o comportamento da partícula fluida estudada é descrita pelas suas propriedades macroscópicas, como velocidade, pressão, densidade e temperatura, além da parte derivativa do espaço e tempo.

As equações que descrevem o escoamento de um fluido vêm das equações de conservação de massa, força, energia e estado. Na formulação de conservação geral de transporte, de forma conservativa, é denotada pela expressão:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \text{div}(\rho \phi u_r) = \text{div}(\Gamma \text{ grad } \phi) + S_\phi \quad (1)$$

onde:

u_r velocidade relativa entre o fluido e a velocidade do sistema de coordenadas,

ϕ quantidade escalar (u, v, z, k, ε , etc.),

Γ coeficiente de difusão,

S_ϕ termo fonte.

Na equação acima, pode-se notar que ϕ pode representar a velocidade, temperatura ou mesmo concentração do componente. O lado esquerdo da equação mostra a taxa de variação de ϕ em função do tempo e o termo convectivo, enquanto o lado direito mostra o termo difusivo e o termo fonte. Para se obter a conservação da massa, utiliza-se $\phi = 1$ e $\phi = u, v, w$ e E . Considerando estas condições o conjunto de equações formados e necessários para a solução dos problemas seria dado pelas Eqs (2) até (6).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} - [(\rho - \rho_\infty) \cdot g]_x \quad (3)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} - [(\rho - \rho_\infty) \cdot g]_y \quad (4)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial w}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial P}{\partial z} - [(\rho - \rho_\infty) \cdot g]_z \quad (5)$$

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\Phi}{k} \quad (6)$$

onde Φ é o termo de dissipação viscosa dada por:

$$\phi = \mu \cdot \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} + \lambda \cdot (\text{div } u)^2 \quad (7)$$

No termo de dissipação viscosa, os termos elevados ao quadrado representam o trabalho de deformação das partículas no movimento do fluido, convertidos em energia interna ou calor. Ele é muito importante em escoamentos intensos, onde a dissipação de energia por atrito entre as moléculas do fluido torna-se muito relevante.

IV.2-Métodos numéricos e suas aplicações

Para que um fenômeno seja corretamente representado e tenha sua solução através de métodos numéricos, ele deve ter sua geometria discretizada. Quando se trata de dinâmica dos fluidos, um problema pode ser resolvido analiticamente com algumas simplificações, ou numericamente, dependendo do grau de complexidade na modelagem do problema. Quando se tem geometrias muito complexas, a simulação numérica é a mais utilizada, baseando-se em três possíveis métodos de solução: método das diferenças finitas, método dos elementos finitos e o método dos volumes finitos.

O método das diferenças finitas (MDF) clássico pressupõe o uso de uma malha estruturada e os valores nos pontos nodais representam as incógnitas do escoamento. Para se obter aproximações de diferenças finitas das derivadas em cada ponto da malha, utilizam-se os valores nos pontos vizinhos e expansões das séries de Taylor. Dessa forma, as derivadas obtidas nas equações de transporte são substituídas pelas diferenças finitas, resultando em uma equação algébrica para os valores das grandezas de interesse em cada ponto da malha. Entretanto, cabe ressaltar que a implementação de um sistema de coordenadas generalizado pode ser feita e permite que o método de diferenças finitas também seja utilizado nestes casos.

O método dos elementos finitos (MEF), por sua vez, utiliza-se de funções de aproximação para descrever as variações das grandezas a serem calculadas dentro de cada elemento. Neste caso as aproximações são válidas apenas no interior de cada um dos elementos e a soma das contribuições de todos elementos resulta em uma aproximação funcional para as variáveis estudadas em todo o domínio do cálculo.

Quando as funções obtidas para as variáveis são substituídas nas equações de transporte, elas deixam de ser exatas e passam a ter um resíduo que pode ser usado para medir o erro da simulação. Cada equação aproximada é multiplicada por um conjunto de funções peso e integrada no domínio de cálculo. O resultado obtido é um sistema de equações algébricas para determinar os coeficientes de cada aproximação.

O método dos volumes finitos é o mais utilizado atualmente em CFD e sua técnica baseia-se inicialmente na discretização de todo o domínio em volumes de controle, seguida da integração formal das equações de transporte que regem o escoamento.

Segundo Buscariolo (2009), nessa integração, a forma conservativa de cada equação é usada para que seja possível transformar as integrais em volume dos divergentes dos fluxos advectivos e difusivos em integrais em área dos fluxos normais à superfície dos volumes de controle, através da aplicação do teorema da divergência. Apesar de ser uma operação exata, para a total discretização do volume são necessários métodos numéricos para aproximação dos campos às variáveis conservadas. Dessa forma, assim como nos outros métodos, obtém-se um sistema algébrico de equações.

A precisão dessas aproximações e a conservação dos fluxos através das superfícies dos volumes de controle são os aspectos mais importantes no método dos volumes finitos.

O Método dos Volumes Finitos busca a solução numérica das Equações de Navier-Stokes e como citado em Bradshaw et al. (1981) apresenta limitações devido à erros numéricos chamados de falsa difusão e dispersão numérica. A falsa difusão ocorre quando a função de interpolação difere da solução exata, porém com os avanços dos softwares, esse problema tem sido minimizado. No Método dos Volumes Finitos (MVF) divide-se o domínio em células elementares e integra-se então as equações de transporte escalar no espaço e tempo, que pode ser generalizada na forma:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot u_r \cdot \phi - \Gamma \cdot \text{grad } \phi) = S_\phi \quad (8)$$

onde:

ρ : densidade

u_r : velocidade média

ϕ : propriedade transportada

Γ : coeficiente de difusividade

A forma integral desta equação em regime permanente para um volume VC , delimitado por uma superfície é dada por:

$$\int_{VC} (\rho \cdot \phi \cdot u_r) dV - \int_{VC} \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad } \phi) dV = \int_{VC} S_\phi dV \quad (9)$$

Através da aplicação do teorema do divergente tem-se que:

$$\oint (\rho \cdot \phi \cdot u_r) dA - \oint \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad } \phi) dA = \int_{VC} S_\phi dV \quad (10)$$

Aplicando esta equação para cada volume de controle (célula volumétrica), obtêm-se:

$$\sum_f^{N_{\text{faces}}} (\rho_f \cdot \phi_f \cdot u_{r,f}) \bar{A}_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_f \cdot (\text{grad } \phi_f)_n \bar{A}_f + \int_{VC} S_\phi dV \quad (11)$$

onde:

N_{faces} : número de faces de cada célula

ϕ_f : valor da propriedade ϕ transportada através da face f

S_ϕ : termo fonte

$(\rho_f \cdot \phi_f \cdot u_{r,f}) \bar{A}_f = J_f \cdot \bar{A}_f$: fluxo de massa através da face f

$\bar{A}_f$: área da face f

$(\text{grad } \phi)_n$: gradiente da propriedade normal a face f

V : volume da célula.

Esta equação é aplicada em cada célula computacional, onde os valores das propriedades escalares são armazenados no ponto central da célula (C_0 e C_1 da Figura 11) e interpolados para cada face da mesma. O cálculo das diferenças centradas é utilizado na convecção, sendo que este esquema não leva em consideração a direção do escoamento. Para suprir esta deficiência, utiliza-se o esquema de “Upwind”, onde o valor de ϕ_f é tomado na célula a montante, relativa à direção normal da velocidade do

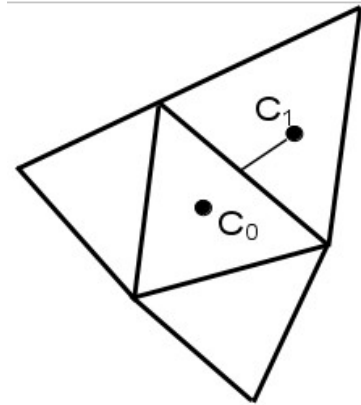


Figura 11: Volume de Controle representativo da discretização das equações do transporte escalar.

escoamento.

O software **FLUENT**[®] utiliza como padrão o gradiente de célula centrada (“Upwind” de primeira ordem) baseando-se na média dos valores das células C_0 e C_1 como mostrado na Figura 11. Neste caso, os valores são calculados pela média de ϕ de duas células adjacentes a face.

$$\bar{\phi}_f = \frac{\phi_{C0} + \phi_{C1}}{2} \quad (12)$$

Esse gradiente é limitado de modo que não produzam máximos ou mínimos, como apresentado em Fluent Inc. (2003). Neste trabalho, optou-se pelo esquema de segunda ordem e desta forma obter maior precisão nos resultados.

No esquema “Upwind” de segunda ordem, as quantidades escalares nas faces da célula são computadas com a utilização do método linear de reconstrução multidimensional. Nesta aproximação, a alta ordem de precisão é alcançada nas faces através da utilização da expansão da série de Taylor. Nesse esquema, a quantidade escalar é calculada utilizando-se a expressão:

$$\phi_f = \phi + grad\phi \cdot \Delta s^I \quad (13)$$

onde:

- | | |
|----------------|--|
| ϕ_f : | valor escalar de f da célula centrada a jusante; |
| $grad\phi$: | gradiente da célula centrada a jusante; |
| Δs^I : | vetor deslocamento do centróide da célula a jusante em |

relação ao centróide da face.

A equação (13) necessita do valor do gradiente de ϕ em cada célula. Este gradiente é calculado utilizando o teorema do divergente, que pode ser aproximado numericamente na forma:

$$\nabla\phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{faces}} \bar{\phi}_f \vec{u} A \quad (14)$$

IV.2.1 Equações Aproximadas na Forma Linear

A equação geral do problema possui a variável ϕ como incógnita no centro da célula, assim como nas células adjacentes, e apresenta ainda uma relação não-linear principalmente quando esta variável é qualquer uma das velocidades. Para a resolução do problema, uma forma linear e iterativa da equação é proposta na seguinte forma:

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (15)$$

onde os índices “ nb ” que se referem às células vizinhas e “ a_p ” e “ a_{nb} ” são os coeficientes lineares de “ ϕ ” e “ ϕ_{nb} ”. O número de células vizinhas depende da topologia dos pontos nodais que tipicamente será igual ao número de faces da célula. A equação é escrita para cada célula do modelo, formando um sistema de equações algébricas, cuja matriz dos coeficientes é uma matriz esparsa. Na solução desta matriz, utiliza-se o método de sub-relaxação para o controle da variação de ϕ durante o processo iterativo. De forma simplificada, o novo valor ϕ_{novo} de uma célula irá depender do seu valor na iteração anterior, ϕ_{antigo} e de um coeficiente de sub-relaxação α_r como segue na equação abaixo:

$$\phi_{novo} = \phi_{antigo} + \alpha_r \cdot (\phi_{novo} - \phi_{antigo}) \quad (16)$$

IV.2.2 Acoplamento Pressão-Velocidade

O algoritmo de solução numérica utilizada neste trabalho é o método segregado, onde as equações são resolvidas sequencialmente. Como as equações que governam são não-lineares, várias iterações devem ser feitas até a convergência da solução seguindo as seguintes etapas:

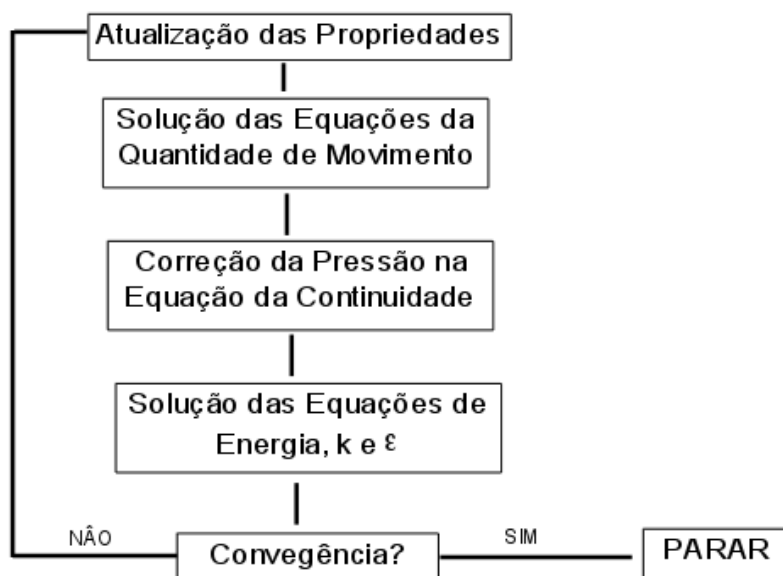


Figura 12: Algoritmo do Método de Solução Segregado.

1- As propriedades do fluido são atualizadas com base na solução anterior.

2- As equações de momento em u, v e w são resolvidas uma de cada vez utilizando-se o valor atual da pressão e fluxo de massa na face para a atualização do campo de velocidade.

3 - Quando a velocidade obtida na etapa 2 não satisfaz as condições de continuidade, correções na pressão devem ser feitas de modo a garantir a convergência.

4 - Cálculo das quantidades escalares como a energia, k , e ϵ .

5 - Verificação da convergência.

A Figura 12 apresenta um fluxograma deste procedimento para auxiliar na compreensão do processo de solução utilizado pelo FLUENT. Este procedimento é comumente utilizado e, como destacado, o procedimento iterativo aparece em função da linearização do sistema de equações.

Como pode ser visto, a pressão irá desempenhar um papel crucial nas equações da continuidade, mesmo que não esteja explícita a influência na equação da continuidade. O algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*), apresentado em Patankar (1980), é essencialmente um algoritmo de tentativa e correção para o cálculo da pressão nas células computacionais.

O algoritmo inicia com a utilização do campo de pressão p^* para a solução do campo

de velocidade u^* ou de fluxo dado por:

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f \cdot (p_{c0}^* - p_{c1}^*) \quad (17)$$

onde :

J_f^* : é a função de fluxo de massa $\rho \cdot u^*$ através da face f

d_f : função da razão da área da célula em relação aos coeficientes lineares “ap”

Para satisfazer a condição de continuidade, a função de correção da pressão J_f' é introduzida na função de fluxo J_f^* resultando em uma função de fluxo corrigida é dado por:

$$J_f = J_f^* + J_f' \quad (18)$$

onde a função de correção é dada por:

$$J_f' = d_f \cdot (p_{c0}' - p_{c1}') \quad (19)$$

onde p' é o termo da correção de pressão.

O algoritmo SIMPLE substitui as equações de correções da pressão dentro da equação de continuidade, equação 2:

$$a_p \cdot p' = \sum_{nb} a_{nb} p_{nb}' + b \quad (20)$$

e o termo fonte b é o fluxo de massa através da célula computacional:

$$b = \sum_f^{N_{faces}} J_f^* A_f \quad (21)$$

A equação da correção da pressão é resolvida iterativamente até a convergência. Neste processo computacional, a equação de correção da pressão está sujeita à divergência no resultado, portanto, é necessário um processo de sobre-relaxação α_p nas correções dos valores de pressão e de fluxo, da seguinte forma:

$$p = p^* + \alpha_p \cdot p' \quad (22)$$

e por conta disto a expressão 19 pode ser reescrita na forma:

$$J_f = J_f^* + d_f \cdot (p'_{c_0} - p'_{c_1}) \quad (23)$$

IV.3-Método de Geração de Malha

A geração da malha para este trabalho foi baseada na geometria obtida através de um software de CAD, que possui informações detalhadas sobre os coletores. O software utilizado para modelagem geométrica foi o **Unigraphics®**. Neste trabalho apenas a malha bidimensional foi utilizada para solução do escoamento.

IV.3.1 Malha Superficial Bidimensional

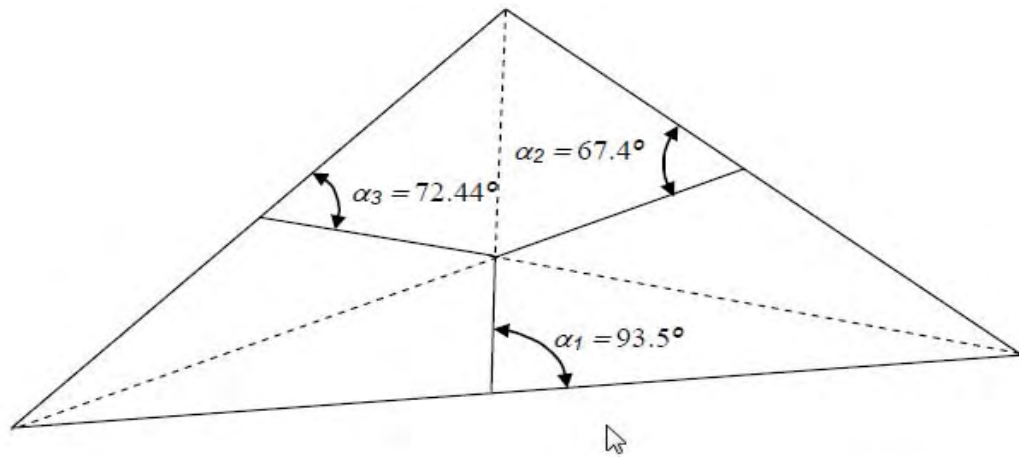
Com base nas superfícies geradas pelo *software* gráfico, a geração de malha superficial com elementos triangulares foi feita com base no *software* **Hypermesh®** versão 10, ambos licenciados pela General Motors do Brasil, o qual utiliza o método “*Advancing Front*”. Para cada coletor foi utilizada uma malha de aproximadamente 32000 elementos. Este método de geração de malha, de acordo com Quim (2007), baseia-se no seguinte algoritmo:

1. Discretização da fronteira (perímetro) da superfície em número de partes (N_s) através dos comprimentos mínimos estabelecidos pelo usuário (δ_m):

$$\Lambda_s = \int_0^l \frac{1}{\delta_m} dl$$

$$N_s = abs(\Lambda_s)$$

2. Para cada segmento da fronteira, criar elementos triangulares até o fechamento do perímetro (vide Figura 13 etapa 1).
3. Considerar o novo domínio a fronteira dos elementos anteriores.
4. Proceder as etapas 2 e 3 da Figura 13, até o preenchimento da superfície com todos os elementos.
5. Correção dos elementos com a maximização dos menores ângulos dos elementos triangulares através do algoritmo de suavização “smoothing” onde os nós são re-posicionados para ter a melhor qualidade.



$\alpha_{\min} = 67.4^\circ$ ângulo de distorção "Skew" = $90^\circ - 67.4^\circ = 22.6^\circ$
 Figura 15: Determinação do ângulo de distorção "skew".

Desta forma, deve-se estabelecer as seguintes condições para as arestas adjacentes de modo a encontrar a posição inicial C1 :

$$\delta_l = \begin{cases} 0.55 AB & \delta_m < 0.55 AB \\ \delta_m & 0.55 AB < \delta_m < 2 AB \\ 2 AB & 2 AB < \delta_m \end{cases} \quad (24)$$

Com esta condição garante que nenhum elemento tenha distorções excessivas durante o processo de triangularização.

Uma forma de medir a qualidade dos elementos 2D é a determinação do seu ângulo de distorção "skew". Este ângulo é calculado da seguinte forma: primeiramente é obtido para cada nó o menor dos ângulos (denominado de $\alpha_{\min}$) entre o vetor que liga o nó ao ponto médio da aresta oposta e o vetor que liga os dois pontos médios adjacentes a este nó. O ângulo de "skew" é a diferença do ângulo de 90° com o menor ângulo encontrado. A Figura 15 mostra os procedimentos para determinação do ângulo "skew" para um determinado elemento.

IV.4-Geometrias, malhas e modelo computacional utilizados na solução

Uma breve descrição de como as técnicas descritas anteriormente foram aplicadas na solução das diferentes geometrias avaliadas. Desta forma, para a construção dos modelos computacionais foi necessário desenhar as geometrias bidimensionais de cada um dos sistemas analisados.

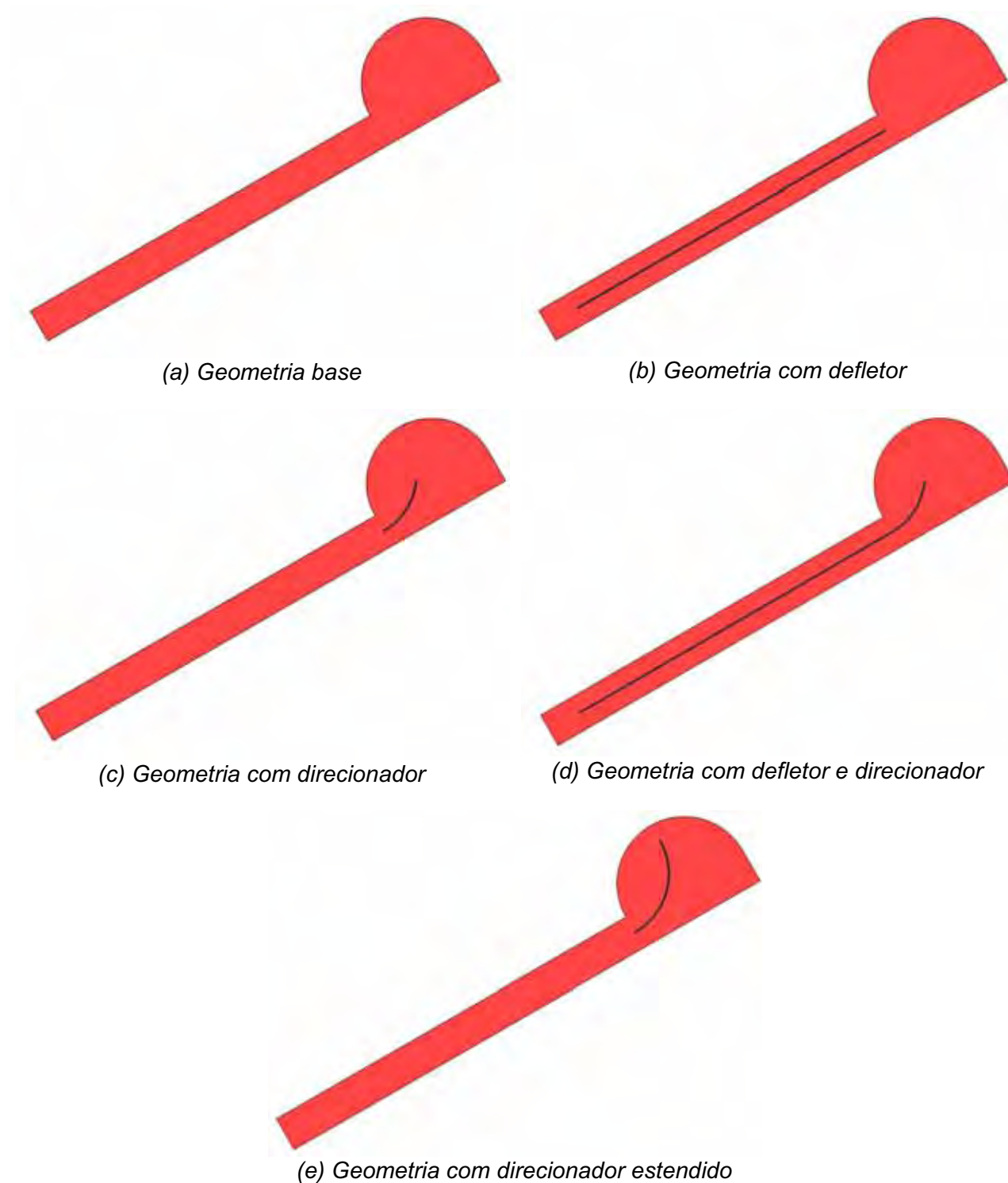


Figura 16: Geometrias tipo cubóide de mesmo volume utilizadas nas simulações.

Um esquema das diversas geometrias avaliadas pode ser visto na Figura 16. Visando identificar o sistema de melhor desempenho e entender quais parâmetros são os mais relevantes na construção de um coletor solar do tipo cubóide, as seguintes geometrias foram estudadas:

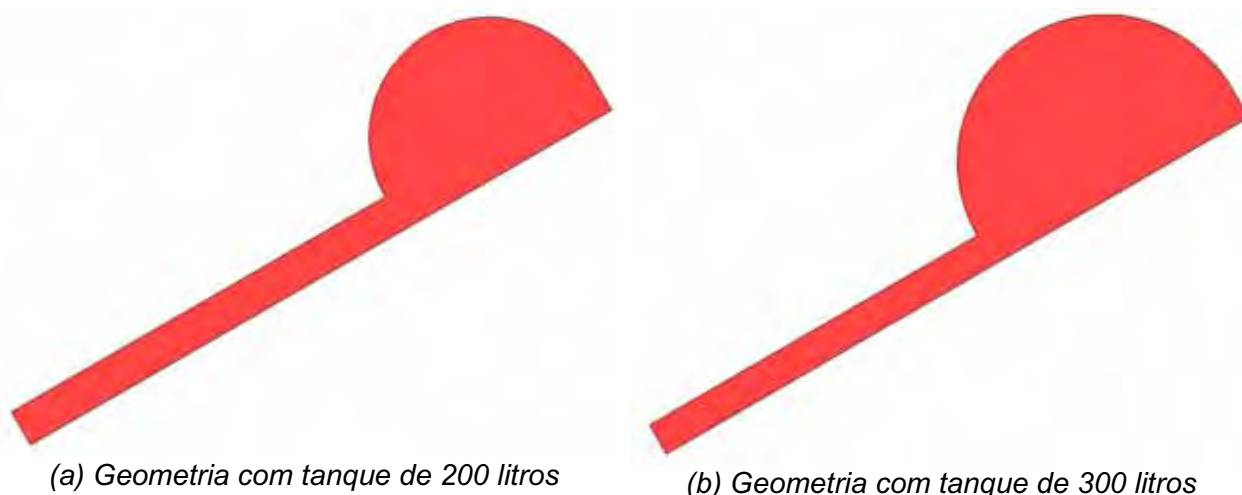


Figura 17: Geometrias tipo cubóide de diferentes volumes.

- (a) geometria cubóide de referência (não modificada);
- (b) geometria cubóide com placa defletora;
- (c) geometria cubóide com direcionador de fluxo;
- (d) geometria cubóide com placa defletora e direcionador de fluxo;
- (e) geometria cubóide com direcionador de fluxo modificado (estendido).

Além destas geometrias, foi analisada também a variação do desempenho com o aumento do volume total da geometria. Para tanto, como mostrado na Figura 17, foram analisadas a geometria base mantendo a área de captação de energia por radiação e modificando o volume total para:

- (a) geometria cubóide com volume de 200 litros
- (b) geometria cubóide com volume de 300 litros

IV.4.1 Malha e condições de contorno

Todas as geometrias apresentadas foram devidamente discretizadas utilizando técnicas tradicionais de elementos finitos com malha triangular não estruturada. Para a construção das malhas foi utilizado o software Hypermesh v.10. Um exemplo das características da malha gerada pode ser visto na Figura 18. Em média foram 32000 elementos para cada cubóide.

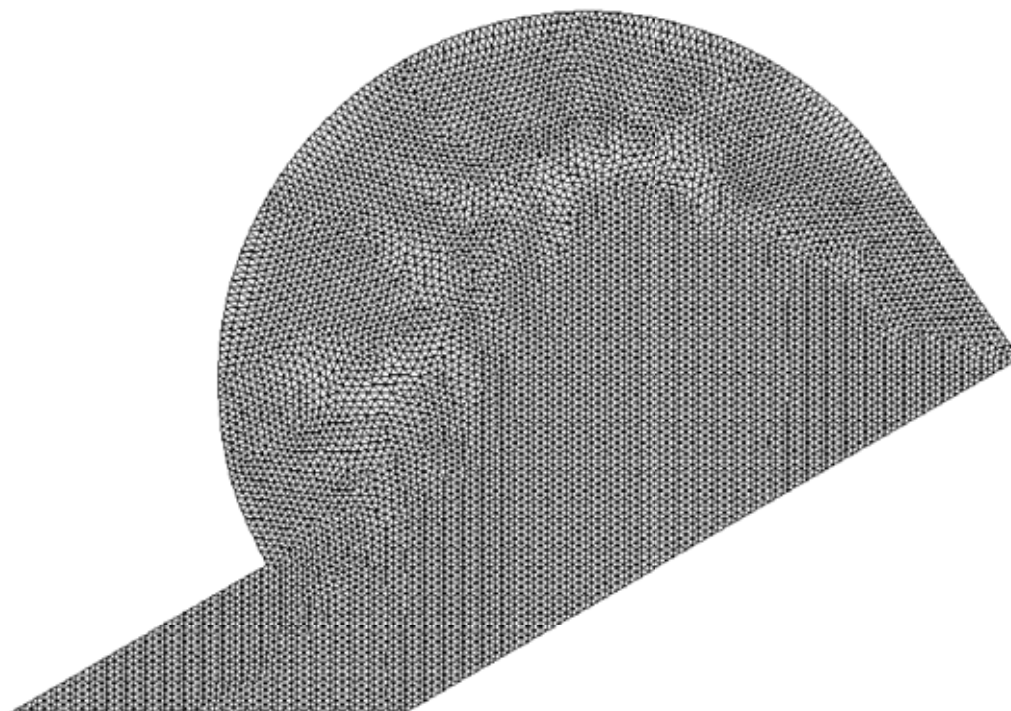


Figura 18: Esquema da malha utilizada na discretização.

Com relação ao modelo numérico e as opções de solução cabe destacar que, em todos os casos, foi utilizada a aproximação de Boussinesq. Este tipo de aproximação supõe que todas as propriedades do fluido são constantes para a convecção natural exceto a densidade que varia linearmente com a temperatura.

Como se trata de um problema de transferência de calor é fundamental que a equação da energia esteja habilitada. Usando este tipo de modelo, foi possível implementar as condições de contorno estabelecidas nos objetivos e determinar o coeficiente de troca de calor ao longo do tempo. Além disto, nenhum modelo de turbulência foi selecionado devido à baixa velocidade de deslocamento do fluido, caracterizado como escoamento laminar.

Nos métodos de solução o esquema de acoplamento pressão-velocidade utilizado foi o SIMPLE, anteriormente apresentado. O esquema de interpolação de pressão utilizado foi o Standard padrão do FLUENT que é aceitável na maioria dos escoamentos. Quando o escoamento estiver envolvido em grandes forças de campo ou fluxo rotativo de alta velocidade, recomenda-se a utilização da interpolação body-force-weighted ou PRESTO!. Esses dois esquemas de interpolação também são tradicionalmente utilizados em simulações de escoamentos multifásicos.

Os fatores de subrelaxação utilizados foram os valores padrão estabelecidos pelo

FLUENT, já que a simulação nos moldes propostos não apresentou problemas de convergência. Os valores residuais de convergência utilizados também foram os valores padrões do software. As simulações foram realizadas em um Cluster da General Motors utilizando 64 CPUs. A etapa de pós-processamento e elaboração de gráficos foi realizado no software Ensignht versão 9.2.1c e, em alguns casos, no próprio módulo do FLUENT.

IV.4.2 Cálculo do coeficiente de estratificação térmica

O coeficiente de estratificação térmica é uma maneira de se quantificar a intensidade da estratificação térmica do reservatório que é um método de armazenamento de energia que faz com que se formem camadas de fluido de diferentes temperaturas sem que elas se misturem. Ele foi apresentado em Sridhar e Reddy (2007) e é adequado para a comparação dos resultados. Quanto maior o fator de estratificação, no caso de armazenadores de coletores solares, maior é a disponibilidade para aproveitamento do calor recebido, possibilitando sua utilização. O Fator de Estratificação (SF) pode ser calculado através da expressão:

$$SF = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{med}}} \quad (25)$$

onde:

$T_{\max}$ - Temperatura máxima instantânea

$T_{\min}$ - Temperatura mínima instantânea

T_{med} - Temperatura média instantânea

e também

$$T_{\text{med}}(t) = T_i + \frac{\int_0^t q_{\text{rad}}'' \cdot A \cdot dt}{m \cdot c_p} \quad (26)$$

onde a temperatura inicial é a obtida no início do processo de aquecimento e resfriamento, $m=131$ kg, $c_p=4,176$ kJ/kg.K e $A=0.9$ m² e para os sistemas com maior capacidade a massa foi de 200kg e de 300kg . Em todos os casos, as condições de contorno transientes são as mesmas e então todas possuem a mesma temperatura média para o mesmo passo de tempo.

V Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas simulações de aquecimento e resfriamento do fluido em coletores solares com armazenador integrado, comparando as diferentes geometrias em termos de temperatura máxima após período de aquecimento, temperatura máxima após o período de resfriamento e o fator de estratificação de cada uma. Serão apresentados também resultados complementares comparando diferentes dimensões de elementos da malha.

V.1-Validação da malha utilizada

As dimensões das células superficiais dos sistemas coletor-armazenador foram estudadas com o propósito de se mostrar sua influência tanto na precisão do método quanto no tempo de processamento despendido para realizar os cálculos. Essas células são também conhecidas como elementos de malha e nesse trabalho terão 3 tamanhos distintos utilizados.

Assim sendo, a malha inicial utilizada é constituída por elementos de dimensão de 3mm de lado, e em seguida foram testados outras duas dimensões de lado de elemento distintas: 1.5 mm e 4 mm confirmando a consistência da relação tempo de processamento / precisão do modelo da malha de 3 mm. Cabe destacar que o tempo de processamento foi reduzido em 50% ao se migrar de uma malha de 1.5 mm para a de 3 mm. Os resultados obtidos para as diversas malhas podem ser vistos na Figura 19.

A validação do modelo numérico foi realizada comparando resultados obtidos na mesma configuração (dimensões e condições de contorno) com os apresentados no previamente neste trabalho, onde o modelo numérico correlacionava-se de maneira satisfatória com o protótipo construído.

Uma comparação entre os resultados obtidos pelo modelo do presente trabalho com os apresentados por Sridhar e Reddy (2007) também pode ser visto na Figura 19. Por

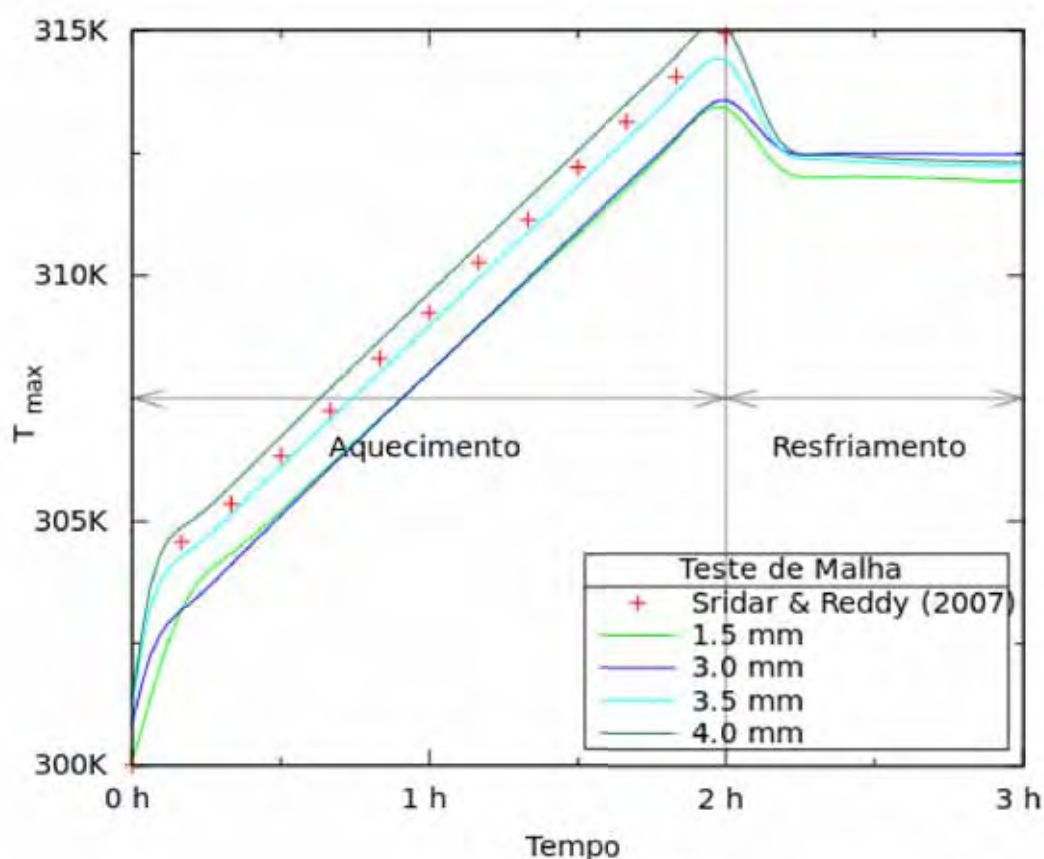


Figura 19: Estudo de validação de malha.

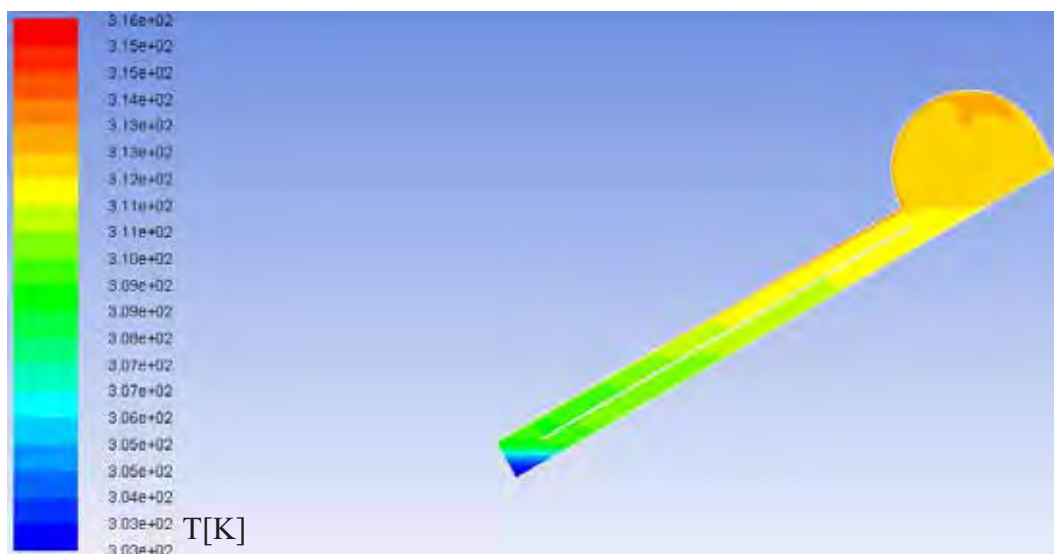
estes resultados é possível verificar a boa concordância de resultados e indicando, a adequação do modelo proposto para a solução do referido problema.

Em função destes estudos realizados, definiu-se a malha triangular de 3 mm de lado como valor adequado em função de seus bons resultados e minimização do tempo computacional. Este valor foi determinado com base nos resultados anteriormente obtidos.

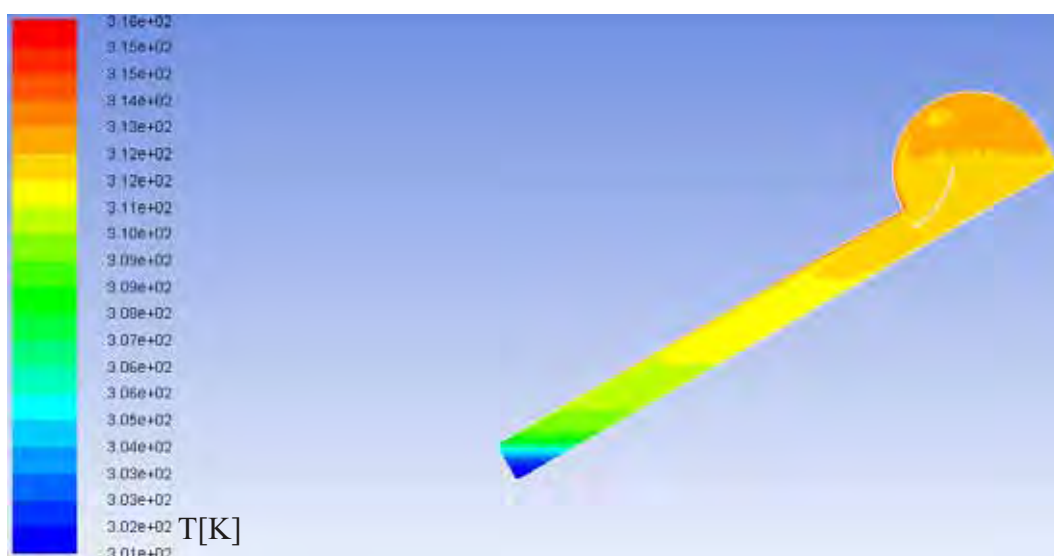
V.2-Estudo da temperatura máxima em cada geometria após o aquecimento

Para todos os casos foram mantidas as condições de contorno e apenas as características especificadas anteriormente com relação à geometria do sistema foram alteradas. Partindo do modelo base proposto, foram feitas as alterações na tentativa de aperfeiçoar o sistema na obtenção e manutenção de altas temperaturas. Os resultados observados em todos os casos podem ser vistos nas Figuras 20 e 21.

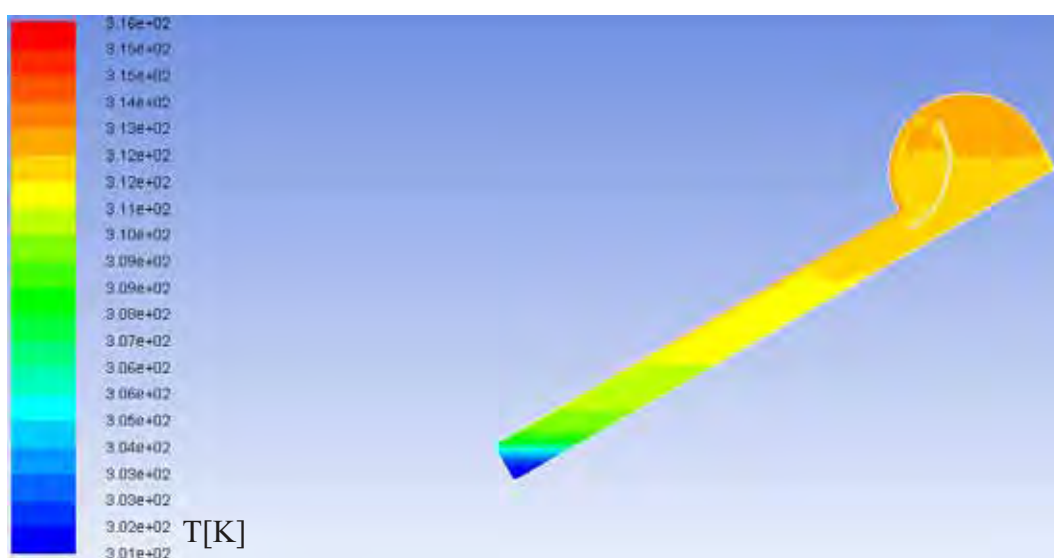
Observando os resultados nas Figuras 20 e 21, nota-se que as temperaturas máximas no período de aquecimento alcançadas nos sistemas são muito próximas,



(a) Geometria com defletor

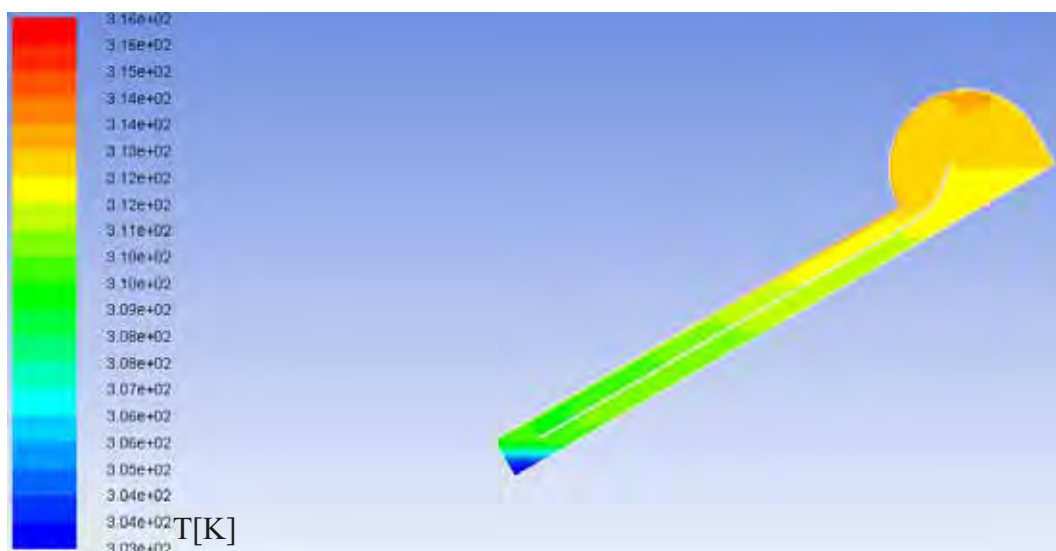


(b) Geometria com direcionador

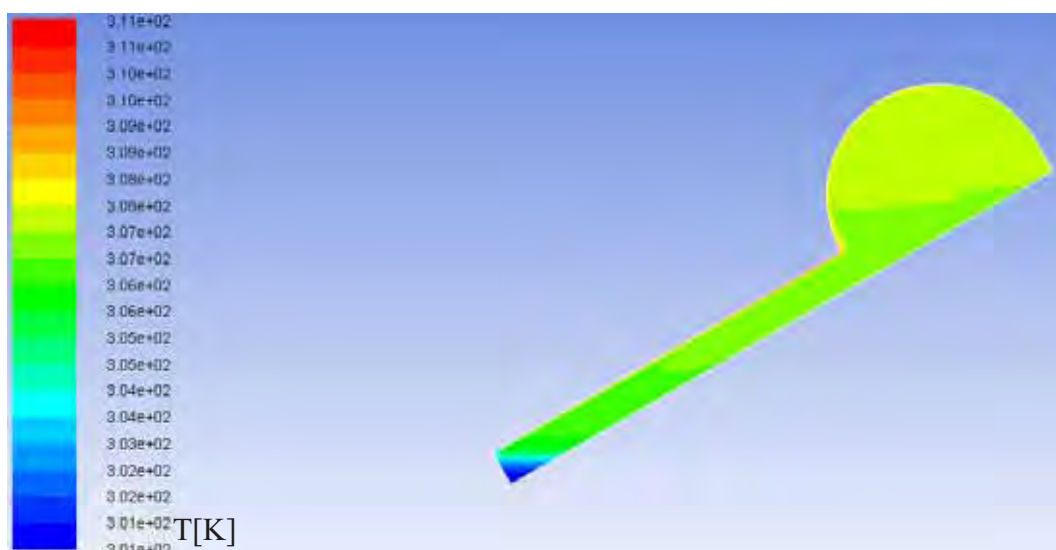


(c) Geometria com direcionador expandido

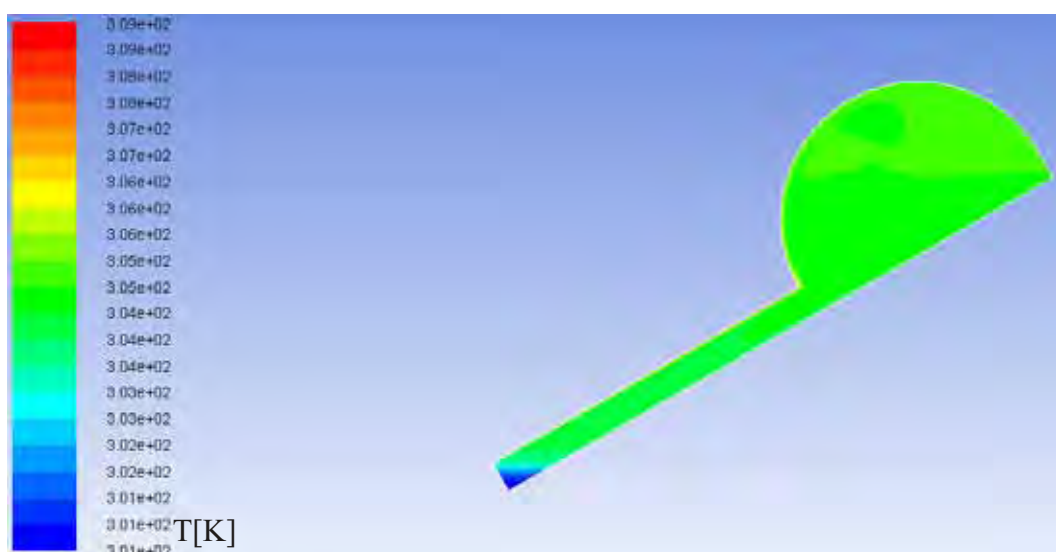
Figura 20: Temperatura máxima plotada ao término do aquecimento para geometrias modificadas (parte 1).



(a) Geometria com defletor e direcionador



(b) Geometria padrão com volume de 200l.



(c) Geometria padrão com volume de 300l.

Figura 21: Temperatura máxima plotada ao término do aquecimento para geometrias modificadas (parte 2).

apresentando diferenças menores de 1K ao final da etapa de aquecimento. Cabe destacar que apenas a estratificação e temperaturas podem ser avaliadas, uma vez que a placa receptora tem a mesma dimensão em todos os casos e, em função da radiação constante, todos os casos recebem e armazenam a mesma quantidade de energia térmica. Para os sistemas com capacidade maior, é natural uma diminuição da temperatura média uma vez que houve um aumento da capacidade térmica com o aumento de volume de água.

Analisando os resultados individualmente nota-se que, embora a temperatura máxima seja praticamente a mesma, os volumes de água quente podem variar entre os diferentes casos. Assim sendo, analisando apenas o período de aquecimento, percebe-se uma pequena diferença na região superior do armazenador. Em geral, os sistemas com direcionador de fluxo demonstram ligeira vantagem por possuir um maior volume de água nas temperaturas mais elevadas como mostram as Figuras 20(b) e (c). Cabe notar ainda que o direcionador quando acompanhado da placa separadora apresenta volumes de água quente menores, como mostra a Figura 21(a). Na realidade, o sistema com placa e direcionador de fluxo tem um perfil de temperatura muito parecido com o sistema que possui somente a placa mostrado na Figura 20(a), com ligeira vantagem para o que também tem uso do direcionador. Desta forma, percebe-se que a presença da placa separadora facilita o escoamento do fluido no interior do coletor, proporcionando uma maior uniformidade da temperatura. Como análise primária pode-se dizer que o sistema com direcionador de fluxo tem um desempenho melhor, gerando maior volume de água há uma temperatura elevada para a mesma situação quando comparado aos demais.

A influência do volume de água também foi analisada e verificou-se que os sistemas com maior volume além de possuírem temperatura de mistura mais baixa como previsto, também apresentam uma sensível redução quando se observa o valor de temperatura máxima. Por conta disto deve-se observar que o aumento do volume de água sem o aumento da área de captação de energia, representa sensível prejuízo com relação aos valores de temperatura máxima no sistema como pode ser observado nas Figuras 21(b) e (c).

Para tentar entender melhor este fenômeno é apresentado na Figura 22 as distribuições dos vetores de velocidade ao final do tempo de carregamento para os casos de utilização da placa defletora e da placa separadora. Observando a Figura 22(a) nota-

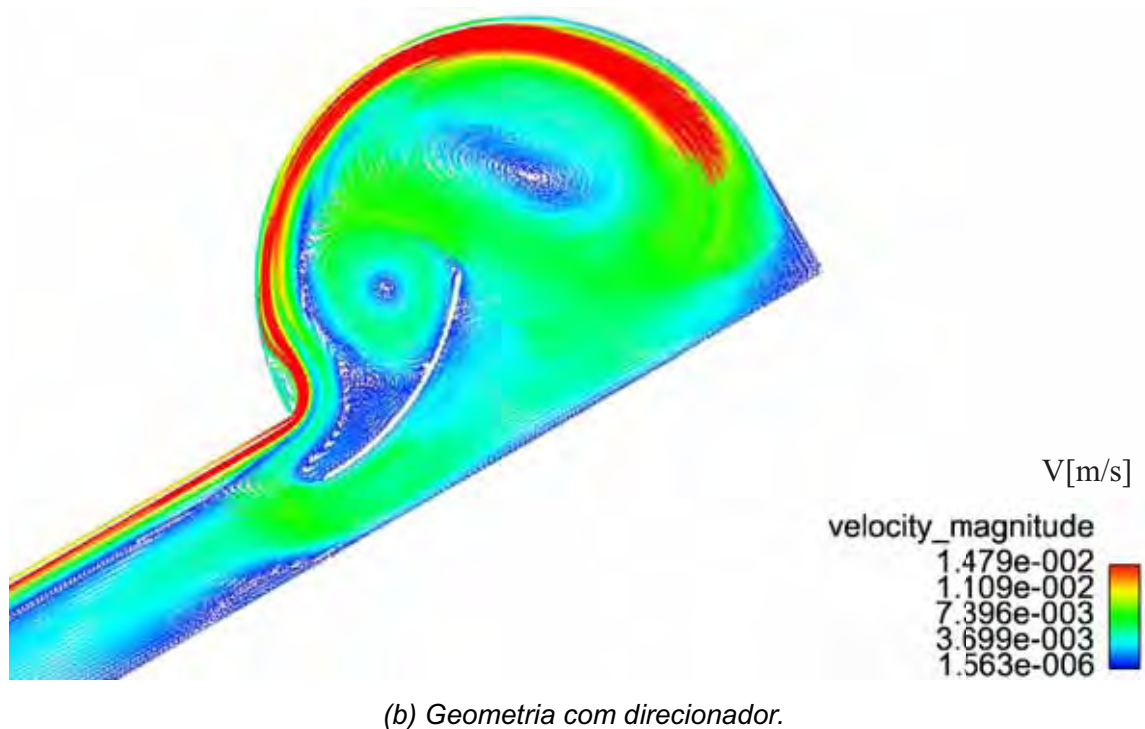
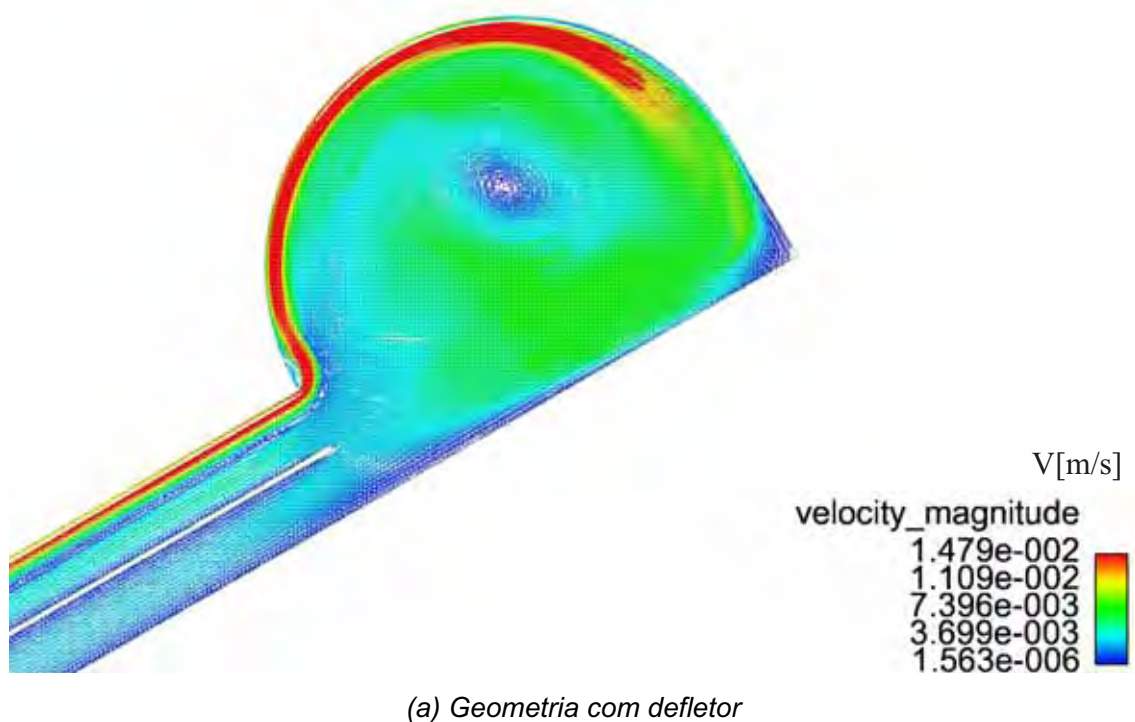


Figura 22: Detalhes do perfil de velocidades ao final do carregamento.

se que no sistema com placa, a recirculação de água no reservatório é menor, ou seja, não oferece restrições para que a água quente saia do reservatório. Já o sistema com direcionador, mostrado na Figura 22(b), dificulta a saída da água quente, resultando em uma recirculação no interior do sistema capaz de manter uma maior temperatura num volume mais concentrado.

Assim sendo, pode-se deduzir também que a estratificação térmica dos sistemas com placas será menor, justamente pela maior facilidade que o fluido tem para sair do reservatório e trocar calor com a porção de fluido mais fria. Desta forma, reduz o volume de fluido à temperatura mais alta e provoca uma maior uniformidade da temperatura ao longo de todo o sistema.

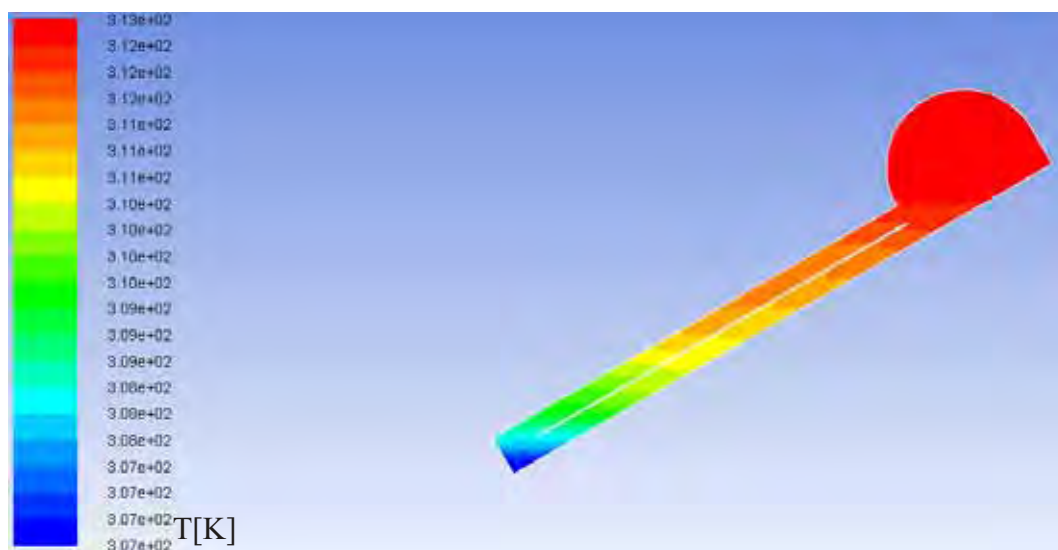
V.3-Estudo da temperatura máxima em cada geometria após o resfriamento

A perda de calor durante o período noturno representa um importante parâmetro no caso de coletores solares integrados. No caso específico deste tipo de geometria, a inclusão do direcionador e/ou da placa defletora permite que seja incluído no sistema um tipo de diodo térmico que previne o sistema da circulação reversa. Este tipo de dispositivo não poderia ser incluído no sistema original onde não há separação entre corrente quente e corrente fria. De qualquer forma, para efeito comparativo a influência deste tipo de circulação reversa nos dispositivos, foi analisada em todos os casos sem a utilização do diodo térmico. Os resultados observados em todos os casos podem ser vistos nas Figuras 23 e 24 em termos de perfil de temperatura

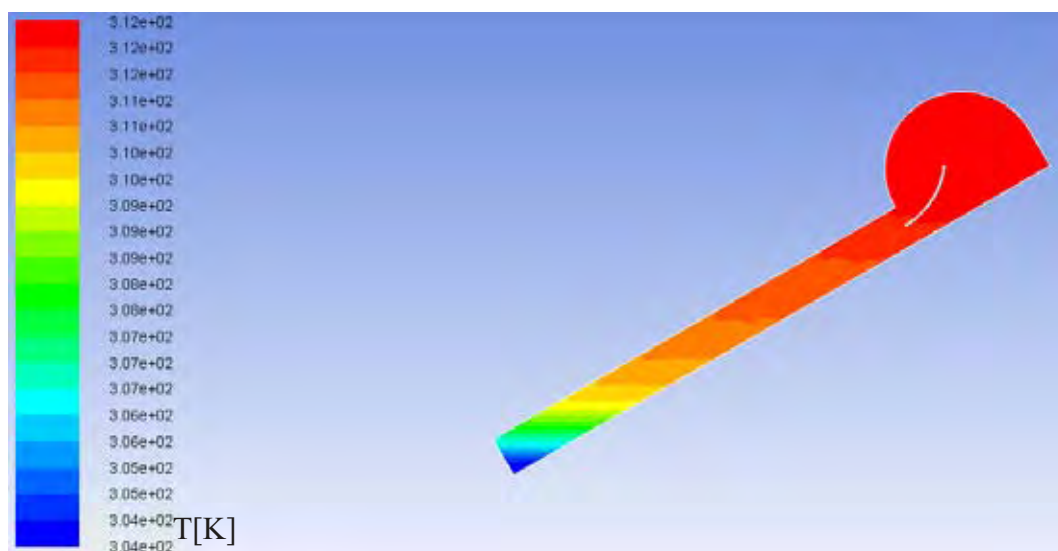
Da mesma forma que no caso do aquecimento, a observação das Figuras 23 e 24 mostra que o valor de temperatura máxima para os sistemas não possuem diferenças significativas em termos de valor, mesmo no período de resfriamento. Neste caso, o que difere nos sistemas é a distribuição de temperatura, tanto no período de aquecimento, quanto no período de resfriamento.

Para fazer uma análise completa dos resultados para os sistemas propostos, tem-se que levar em conta como está distribuída a temperatura no interior dos coletores e não somente o valor máximo atingido, já que a quantidade de água próxima à temperatura máxima é o que realmente importa em sistemas de aquecimento de água através de energia solar.

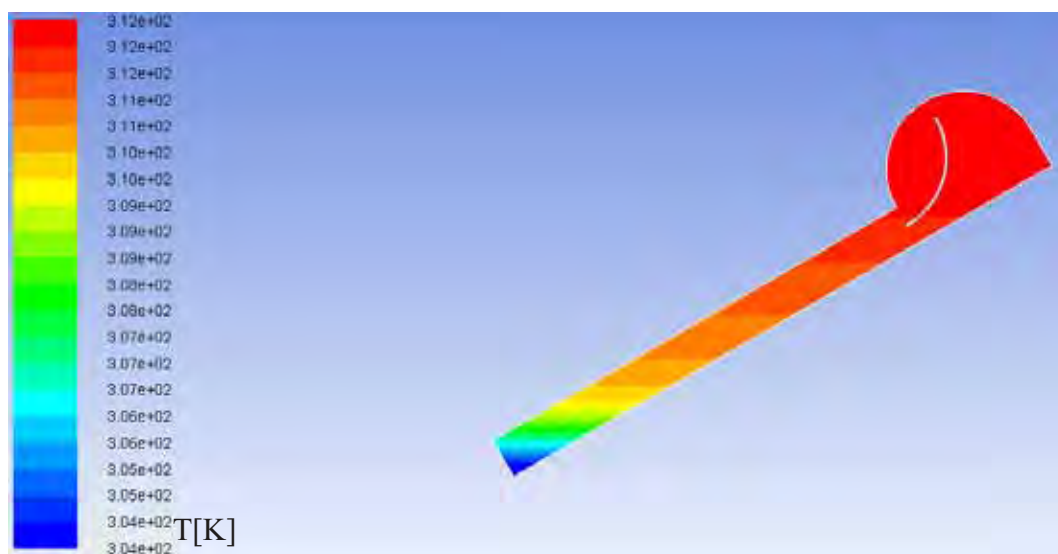
Analisando as figuras apresentadas, após o resfriamento, nota-se que as temperaturas máximas para todas as configurações de mesmo volume são muito próximas, porém com diferenças em termos de camadas de estratificação. O primeiro ponto observado é que os sistemas que possuem placas defletoras têm uma temperatura mínima maior do que os sistemas com somente direcionador. Isso implica que a energia



(a) Geometria com defletor

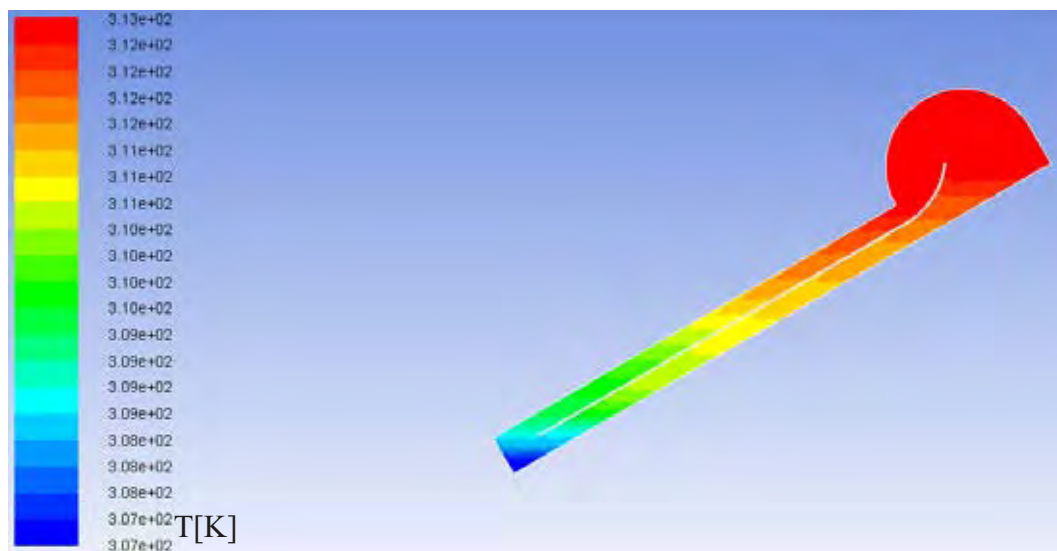


(b) Geometria com direcionador

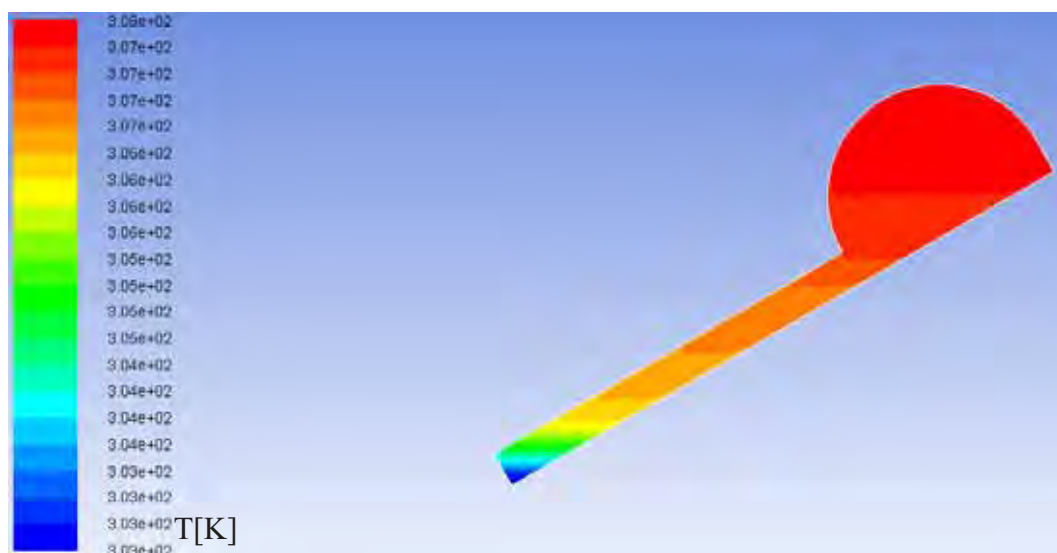


(c) Geometria com direcionador modificado.

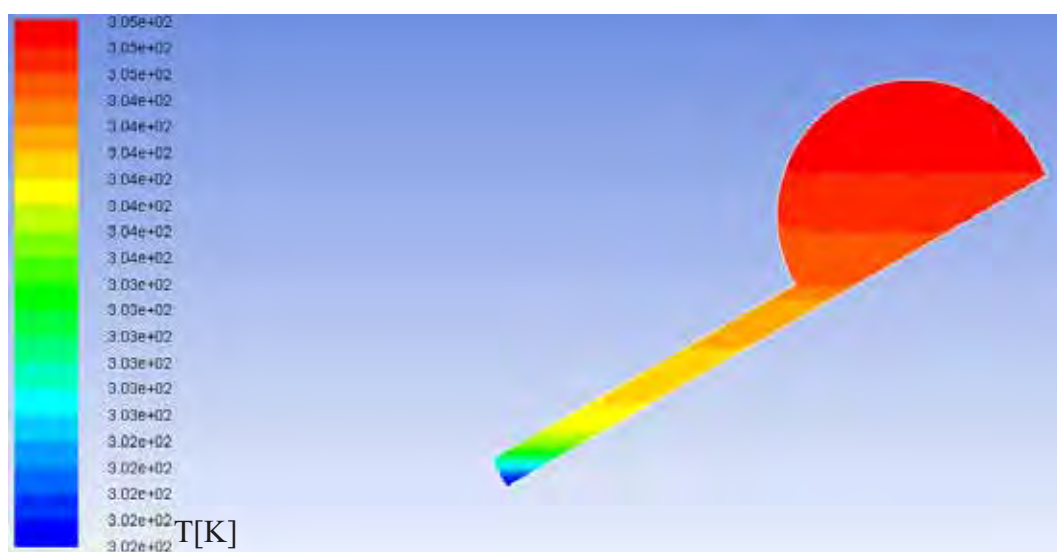
Figura 23: Temperatura máxima plotada ao término do resfriamento para geometrias modificadas (parte 1).



(a) Geometria com defletor e direcionador



(b) Geometria padrão com volume de 200l.



(c) Geometria padrão com volume de 300l.

Figura 24: Temperatura máxima plotada ao término do resfriamento para geometrias modificadas (parte 2).

está distribuída de maneira mais uniforme no domínio e, conseqüentemente, acarreta em uma menor estratificação e em um menor volume de água a temperaturas mais altas.

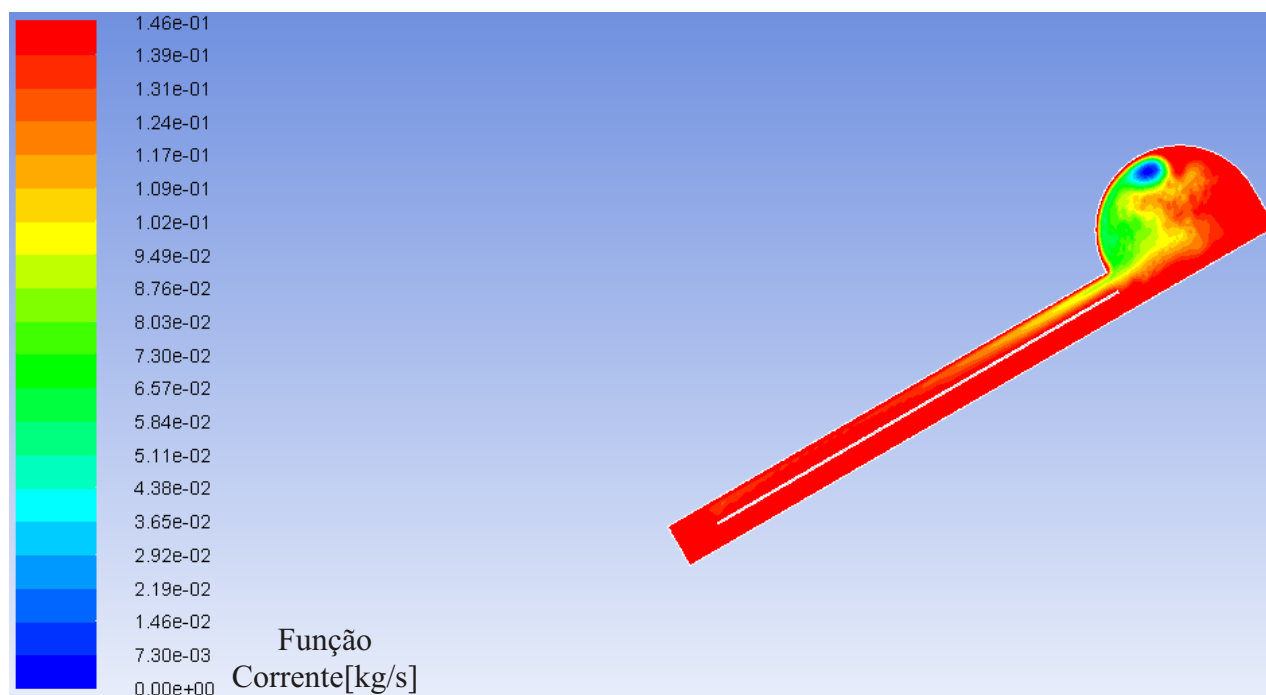
Além deste fato, pode-se verificar de uma análise do gráfico que os sistemas com placa defletora apresentam um maior volume de água quente no interior do reservatório. Nota-se nestes casos, representados nas Figuras 23(b) e (c), camadas bem definidas e com maiores volumes em níveis de temperatura mais altos. Isso difere substancialmente os sistemas com direcionador, dos sistemas com placa.

Além das informações de temperatura do sistema é importante análises de outros parâmetros relacionados ao escoamento como a função corrente. Estas informações demonstram como o fluido se movimenta no interior do sistema. Um sistema que possui temperatura mínima, com valores próximos da máxima, certamente terá uma distribuição de temperatura mais homogênea, ou seja, uma menor estratificação das camadas de nível de temperatura. Observando-se a Figura 25, nota-se que os sistemas com placa circulam o fluido de forma mais intensa, resfriando o sistema mais de maneira homogênea. Esta correlação comprova as expectativas de que a maior movimentação do fluido está associada a uma maior uniformidade de temperaturas.

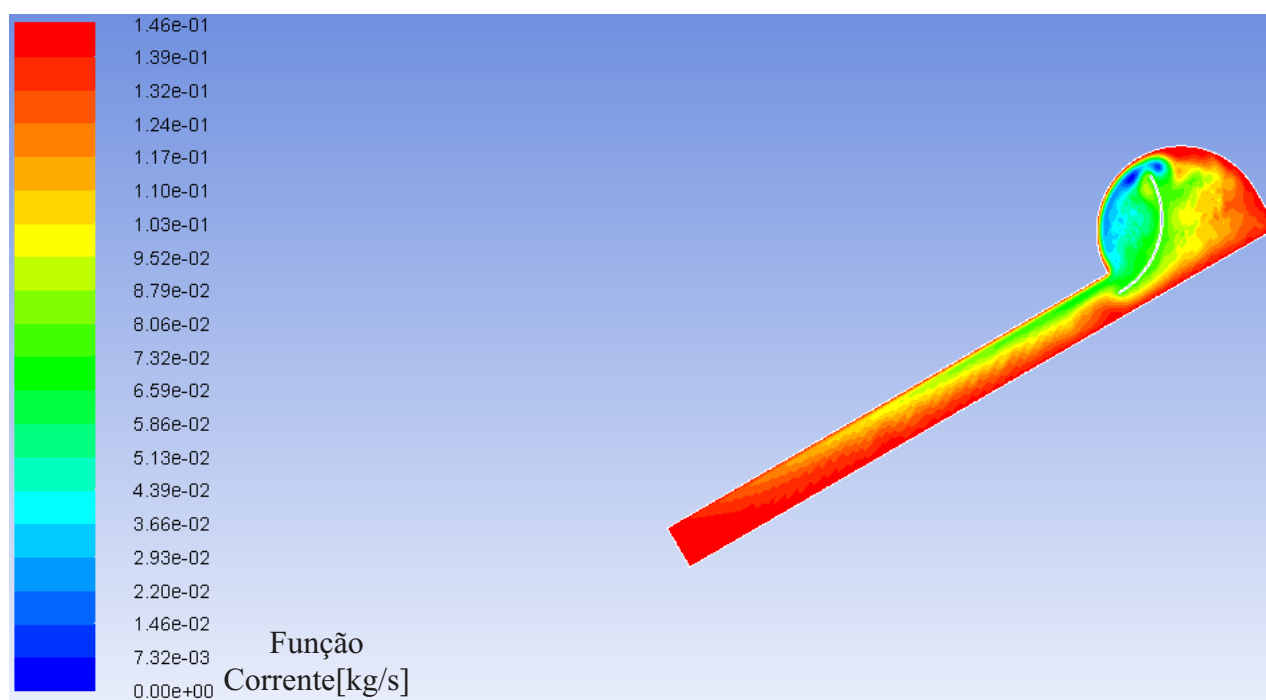
V.4-Análise do comportamento transiente das temperaturas máximas e mínimas e do fator de estratificação

Complementando os resultados de temperatura anteriormente apresentados para as condições no final do tempo de carregamento, são mostrados a seguir diversos gráficos que representam a evolução transiente de diversos parâmetros físicos do sistema coletor armazenador ao longo de todo o tempo de aquecimento e resfriamento. Cabe destacar ainda que, nestes gráficos, está presente ainda uma linha representando a geometria denominada como de “Referência”, que consiste na geometria base e sem quaisquer tipo de alterações geométricas em relação à discutida na literatura. Não foram incluídos nesta análise as alterações que implicavam em mudança do volume de água no interior do dispositivo já que a comparação ficaria prejudicada.

Assim sendo, pode-se observar na Figura 26 que existem ligeiras diferenças de temperaturas entre todos casos estudados. O sistema com a combinação de placa separadora e defletor, seguido de perto pelo sistema de referência, apresentaram as



(a) Geometria com defletor



(b) Geometria com direcionador.

Figura 25: Detalhes do comportamento dos valores da função corrente ao final do processo de resfriamento.

menores temperaturas máximas durante toda a etapa de aquecimento. Os sistemas somente com uma das modificações propostas, apresentam valores máximos

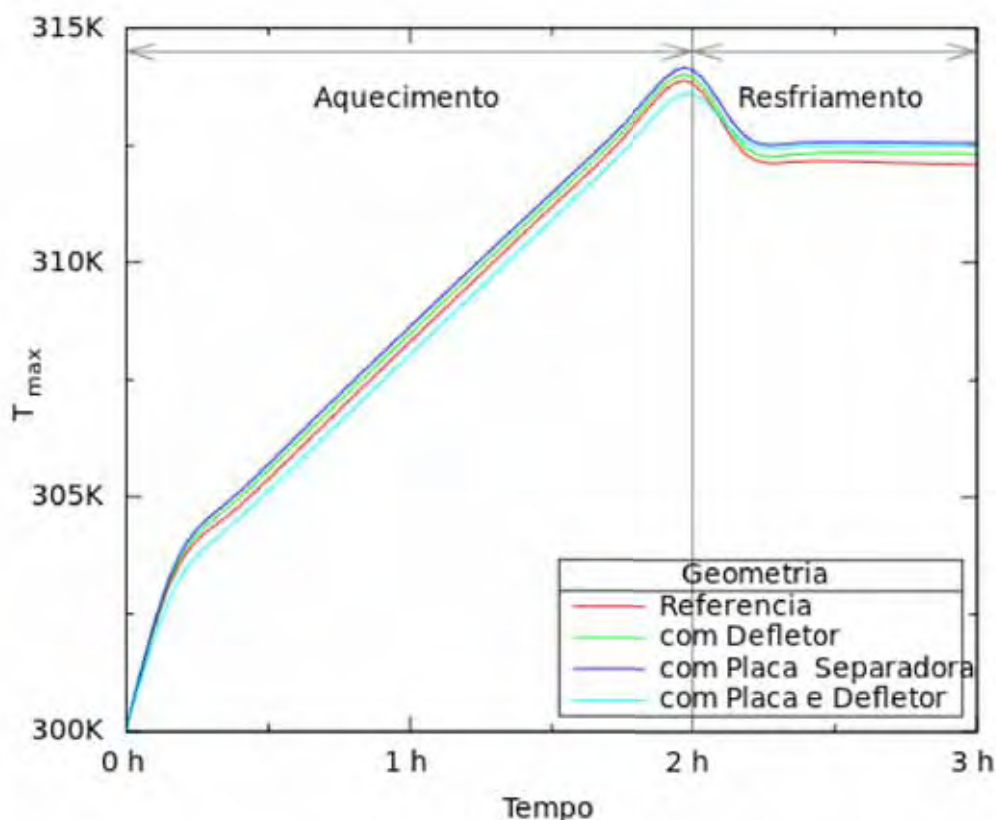


Figura 26: Comportamento da temperatura máxima no interior do domínio durante os processos de aquecimento e resfriamento.

ligeiramente maiores. É interessante ainda destacar que este comportamento se inverte durante a fase de resfriamento, e o sistema combinando as modificações apresenta-se entre os melhores. Esta diferença de comportamento se justifica pelas alterações provocadas no escoamento pela inclusão dos componentes propostos. De qualquer forma, as diferenças de temperatura entre todos os casos e avaliados numericamente são muito pequenas.

Já no caso da temperatura mínima, as diferenças são perceptíveis, conforme está demonstrado na Figura 27. Observando-se esta figura pode-se verificar que os sistemas que possuem placa separadora, com ou sem defletor, apresentam os maiores valores para as temperaturas mínimas. Por outro lado, o sistema inalterado, denominado como de “Referência”, apresenta os menores valores durante quase toda a etapa de aquecimento, perdendo o posto somente ao final desta etapa para o sistema que possui somente o defletor. Na fase de resfriamento, o defletor acelera o processo de uniformização das temperaturas e o comportamento do sistema com defletor se afasta do de referência e se aproxima muito dos sistemas com placas defletoras.

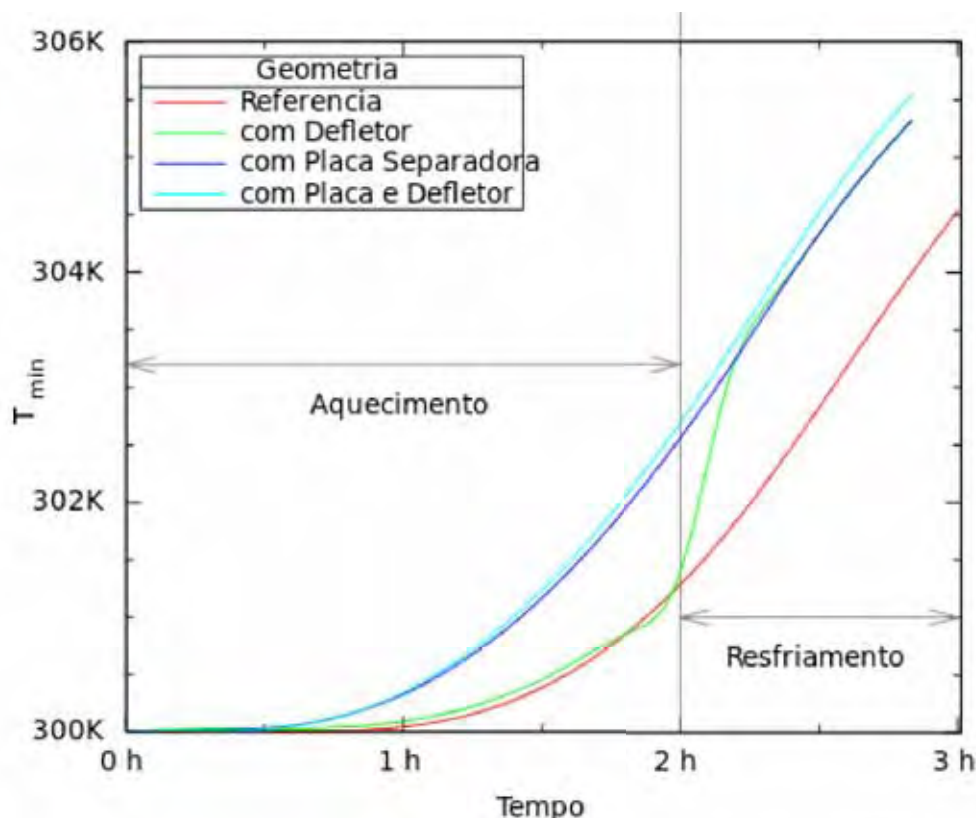


Figura 27: Comportamento da temperatura mínima no interior do domínio durante os processos de aquecimento e resfriamento.

Esse fenômeno ocorre devido a maior movimentação do fluido, principalmente na porção inferior e mais fria do coletor em função da placa que direciona este fluxo. No caso dos coletores sem a placa, o fluido recircula apenas na região próxima ao reservatório e não se mistura com a água fria que está na parte mais baixa do sistema. Esta forma de movimentação garante uma temperatura mínima menor se comparada aos sistemas aos sistemas que possuem placa separadora.

Com relação ao rápido resfriamento do sistema com defletor, uma justificativa parecida poderia ser apresentada. O defletor capta a água quente do reservatório e a redistribui ao longo de todo o sistema. Embora este efeito se apresente totalmente indesejável, ele pode ser contornado com a inclusão de um diodo térmico no sistema, impedindo a recirculação durante o período de resfriamento. Cabe ressaltar que a aplicação do diodo térmico só pode ser implementada nos dispositivos modificados, onde exista separação dos fluxos de água quente e frio.

Através dos resultados apresentados anteriormente, pode-se utilizar a equação (25) e calcular um fator de estratificação SF. Para este cálculo, é necessário ainda a determinação da temperatura de mistura no interior do coletor. Estas temperaturas médias

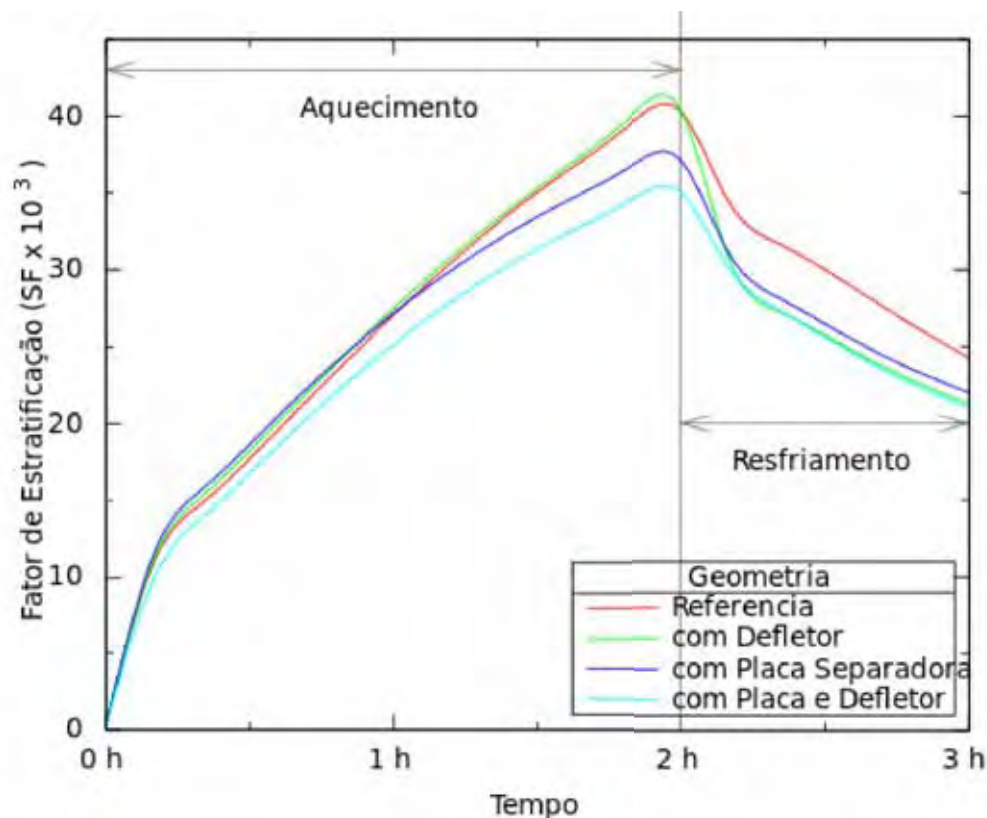


Figura 28: Comportamento do Fator de Estratificação(SF) durante os processos de aquecimento e resfriamento.

são as mesmas para todas as configurações no mesmo instante de tempo, e pode ser calculado utilizando-se à equação (26). Desta forma, o parâmetro de maior influência no fator de estratificação é a diferença entre as temperaturas máxima e mínima. Cabe destacar que quanto mais alto for o fator melhor será a estratificação térmica do conjunto.

A Figura 28 mostra a evolução do SF ao longo do tempo para os dispositivos analisados nas etapas de aquecimento e resfriamento. O comportamento observado apresenta-se muito parecido com o das temperaturas mínimas, uma vez que, como já foi comentado, a temperatura máxima varia muito pouco em função do tipo de dispositivo. De qualquer forma, os resultados para o fator de estratificação apresentados corroboram com as afirmações anteriormente apresentadas.

VI Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros

Com base no trabalho desenvolvido pode-se concluir que:

- o software FLUENT apresentou-se bastante estável, com resultados consistentes e de boa correlação com os resultados obtidos anteriormente por Sridhar e Reddy (2007), que validou seus resultados comparando-os com dados experimentais. Os bons resultados obtidos são diretamente proporcionais à qualidade de malha, que nada mais é do que a dimensão dos elementos e também a minimização de distorções, a escolha correta de parâmetros e condições de contorno. Dessa forma, pode-se prever numericamente o comportamento de sistemas de captação solar com armazenador integrado, sendo uma ferramenta crucial no desenvolvimento de produtos.
- A utilização de simulações para o desenvolvimento de projetos e produtos reduz os gastos com testes, protótipos e retrabalhos, já que antes de construir qualquer protótipo são feitas diversas simulações e só então as mais viáveis passam a serem testadas. Neste caso, a proposta mais viável se mostrou o sistema que utiliza apenas a placa defletora.
- Analisando os gráficos e figuras com isocurvas de temperatura, pôde-se observar que todas as modificações feitas nos parâmetros de projetos seguem a mesma tendência na busca da estratificação, porém com diferenças de intensidade. A geometria que apresentou maior estratificação térmica após o período de resfriamento foi de direcionador modificado fazendo com que o reservatório tivesse a maior porção de água quente e homogênea. Esse é o principal ponto do estudo, já que uma maior estratificação implica numa maior quantidade de água utilizável.
- Quanto à temperatura máxima dos sistemas, com exceção dos coletores de maior capacidade, a temperatura ficou muito próxima entre eles, sendo justificado pelo

mesmo volume e também mesma área de captação. Já a temperatura mínima apresentou maiores diferenças entre os sistemas, principalmente em relação aos sistemas que possuem placas separadoras de fluxo e isso se explica, já que, observando os resultados, pode-se ver claramente que a placa aumenta a velocidade de circulação do fluido, facilitando o movimento de convecção natural e homogeneizando a temperatura no sistema, diminuindo sua estratificação.

Assim sendo, o coletor recomendado como maneira de se aproveitar melhor a energia coletada é o sistema com o direcionador novo de fluxo, contando com a maior estratificação térmica do sistema, principalmente quando comparado com o estudado por Sridhar e Reddy (2007).

Embora alguns passos, tenham sido dados, novos testes deveriam ser feitos para dar continuidade a este trabalho como:

- montar uma bancada de testes para verificar a eficácia do melhor modelo testado e incluindo no mesmo um diodo térmico;
- melhorar as condições de simulação numérica, incluindo um coeficiente de perdas térmicas sobre a superfície de captação de energia;
- considerar o perfil de incidência de energia solar e simular o comportamento do coletor durante um dia inteiro para confirmar o comportamento aqui observado.

Bibliografia

- BEZERRA, A. M. Energia Solar. Disponível em:
<<http://mourabezerra.sites.uol.com.br/textos.htm>>.
- BRADSHAW, P.; CEBECI, T.; WHITELAW, J. H. **Engineering calculations methods for turbulent flows**. Academic Press, 1981.
- BUSCARIOLO, F. F. **Estudo de diferentes tipos de solo em túneis de vento através de simulação numérica**, 2009. São Paulo: Escola Politécnica de Engenharia / USP.
- CHAURASIA, P.; TWIDELL, J. Collector cum storage solar water heaters with and without transparent insulation material. **SOLAR ENERGY**, v. 70, n. 5, p. 403–416, 2001.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 3º ed. Wiley, 2006.
- FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. **Computational methods for fluid dynamics**. Springer-Verlag, 1996.
- FLUENT INC. Fluent 6.1 User's Guide. ,2003.
- GERTZOS, K.; CAOURIS, Y. Optimal arrangement of structural and functional parts in a flat plate integrated collector storage solar water heater (ICSSWH). **EXPERIMENTAL THERMAL AND FLUID SCIENCE**, v. 32, n. 5, p. 1105–1117, 2008.
- GERTZOS, K.; PNEMATIKAKIS, S.; CAOURIS, Y. Experimental and numerical study of heat transfer phenomena, inside a flat-plate integrated collector storage solar water heater (ICSSWH), with indirect heat withdrawal. **ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT**, v. 49, n. 11, p. 3104–3115, 2008.
- IPCC SECRETARIAT. 16 Years of Scientific Assessment in Support of the Climate Convention. ,2004. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/pdf/10th-anniversary/anniversary-brochure.pdf>>. .
- KALOGIROU, S. Design, construction, performance evaluation and economic analysis of an integrated collector storage system. **Renewable Energy**, v. 12, n. 2, p. 179–192, 1997.
- KALOGIROU, SOTERIS. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. Academic Press, 2009.
- KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. **PROGRESS IN ENERGY AND COMBUSTION SCIENCE**, v. 30, n. 3, p. 231–295, 2004.
- KAUSHIKA, N. D.; REDDY, K. S. Thermal design and field experiment of transparent

honeycomb insulated integrated-collector-storage solar water heater. **Applied Thermal Engineering**, v. 19, n. 2, p. 145–161, 1999.

MOHAMAD, A. . Integrated solar collector-storage tank system with thermal diode. **Solar Energy**, v. 61, n. 3, p. 211–218, 1997.

MOHSEN, M.; AKASH, B. On integrated solar water heating system. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 29, n. 1, p. 135–140, 2002.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. Hemisphere Pub. Corp., 1980.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar. ,2006. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

QUIM, N. **Desenvolvimento de uma metodologia de simulação aplicada ao sistema de arrefecimento veicular**. 2007, Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3150/tde-09082007-182717/pt-br.php>>.

SMYTH, M.; EAMES, P. C.; NORTON, B. A comparative performance rating for an integrated solar collector/storage vessel with inner sleeves to increase heat retention. **Solar Energy**, v. 66, n. 4, p. 291–303, 1999.

SMYTH, M.; EAMES P.C.; NORTON B. Heat retaining integrated collector/storage solar water heaters. **Solar Energy**, v. 75, n. 1, p. 27–34, 2003.

SRIDHAR, A.; REDDY, K. Transient analysis of modified cuboid solar integrated-collector-storage system. **APPLIED THERMAL ENGINEERING**, v. 27, n. 2-3, p. 330–346, 2007.

TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y.; YIANOULIS, P. CPC solar collectors with multichannel absorber. **Solar Energy**, v. 58, n. 1-3, p. 49–61, 1996.

VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. 2º ed. Prentice Hall, 2007.

WEISS, W.; BERGMANN, I.; FANINGER, G. Solar Heating Worldwide: Markets and Contributions to the Energy Supply 2006. ,2008. International Energy Agency.

WIKIPEDIA. Solar thermal collector. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_thermal_collector>.