

## ESTUDO DA ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA DE UM *BOILER* PARA AQUECIMENTO DOMÉSTICO DE ÁGUA

Ana Cláudia Ferreira Mendes<sup>1</sup>, Luiz Gustavo Martins Vieira<sup>2</sup>

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química, Avenida João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Campus Santa Mônica, CEP 38400-900, Uberlândia, MG, Brasil.

e-mails: [anaclaudia\\_88@equi.ufu.br](mailto:anaclaudia_88@equi.ufu.br), [luizgustavo@feq.ufu.br](mailto:luizgustavo@feq.ufu.br)

**Resumo:** A região do Triângulo Mineiro possui uma localização geográfica privilegiada que lhe proporciona durante o ano inteiro uma excelente incidência da radiação solar. Sabe-se ainda, que um dos maiores custos com o pagamento da conta de energia elétrica está relacionado com o aquecimento doméstico de água para chuveiros, cozinha ou lavanderia. A conversão da radiação solar em calor é tradicionalmente feita por meios de coletores solares nos quais um fluido tem sua energia interna aumentada, cujos reflexos se revelam também em incrementos na temperatura. Porém, não basta que a energia solar seja apenas coletada, mas também armazenada. Tradicionalmente, o armazenamento da energia solar convertida em calor é feita em tanques revestidos de isolamento (boilers). Assim, este trabalho tem como objetivo estudar a dinâmica de estratificação da temperatura da água em um boiler de um aquecedor solar construído na FEQUI/UFU através das técnicas de fluidodinâmica computacional. As simulações fluidodinâmicas mostraram as taxas mássicas de consumo em que é possível manter a estabilidade da estratificação no boiler garantindo ao usuário o fornecimento de água quente.

**Palavras-chave:** CFD, energia solar, boiler, estratificação, temperatura.

### 1. INTRODUÇÃO

O sol é uma fonte de energia inesgotável. Neste aspecto, o Brasil, especialmente o Estado de Minas Gerais, é privilegiado e recebe uma incidência generosa de radiação solar. Diferente das fontes de energia fósseis, a energia solar é uma energia renovável e ambientalmente correta, haja vista que está disponível diariamente e não gera qualquer tipo de resíduo sólido, líquido ou gasoso ao planeta. Apesar de ser tecnologicamente possível a transformação da radiação solar em energia elétrica (células fotovoltaicas), é na área térmica que ela se mostra amplamente vantajosa.

Por meio das áreas de coletores solares concentradores ou planos, a radiação solar pode ser parcialmente absorvida e transmitida a um fluido, seja sob a forma de calor sensível (aumento de entalpia) ou de calor latente (mudança de fase). Nas residências, escolas, hospitais e comércios a principal utilização dos coletores solares é para o aquecimento da água. Nem sempre a utilização da água aquecida ocorre simultaneamente ao seu aquecimento, como ocorre, por exemplo, em banhos e higienização de objetos em períodos noturnos nos quais não há luz solar. São nestas hipóteses que compete ao usuário adotar estratégias para que a energia térmica captada durante o dia seja armazenada para estar disponível em outros momentos oportunos, tais como acontece nos períodos noturnos. Dentre elas, uma alternativa interessante para o armazenamento do fluido aquecido pela luz solar é aquela feita em tanques denominados de *Boiler*. O *Boiler* é uma estrutura constituída de um tanque com volume definido segundo as conveniências do usuário, cujas paredes encontram-se revestida de algum material isolante. Na verdade, além de armazenar a água quente, é também função do *Boiler* ser um sistema equalizador que permite equilibrar a entrada de água fria (base), a saída de água quente (topo) com aquelas relacionadas com a placa coletora da energia solar.

<sup>1</sup> Acadêmica do Curso de Engenharia Química

<sup>2</sup> Orientador

Assim, este trabalho teve como objetivo estudar a fluidodinâmica de um *Boiler* de 90 L, instalado a uma placa coletora de 1 m<sup>2</sup>, através de balanços de energia e técnicas de CFD, a fim de se verificar o tempo necessário para que o usuário obtivesse determinada temperatura de trabalho (sistema contínuo ou batelada), bem como os perfis de temperatura do fluido em face da natural estratificação que se forma no interior do tanque armazenador.

## 2. MATERIAIS DE MÉTODOS

A metodologia apresentada a seguir refere-se à dinâmica de aquecimento de água no interior de um *Boiler* (sistema contínuo e batelada). Para tanto, numa dada condição operacional, foi realizado um balanço de energia no *Boiler* com o intuito de avaliar em cada caso, a máxima temperatura alcançada pelo fluido e disponibilizada ao usuário, o tempo para que o sistema entrasse em estado estacionário, bem como a distribuição de temperatura no interior do reservatório (estratificação). Para esta última etapa (estratificação), técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) em geometria bidimensional (2D) foram empregadas mediante a utilização do *software* comercial FLUENT 12.0.3. As dimensões geométricas do *Boiler* e as principais condições de contorno advieram de uma unidade piloto construída nas dependências da FEQUI/UFU acerca dos Aquecedores Solares de Baixo Custo (ASBC). Uma representação esquemática do sistema com circulação contínua (fornecimento de água fria da rede pública, simultâneo à retirada de água quente pela parte superior do *boiler*) é apresentada na Figura 1.

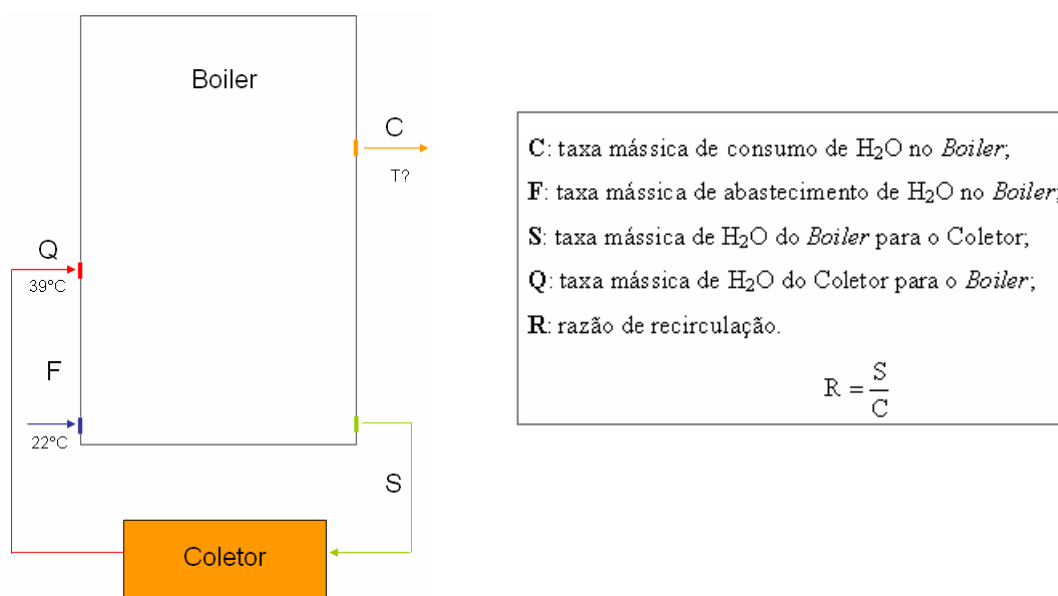


Figura 1: Representação esquemática de um ASBC com um *boiler* com capacidade de 90 L (Fonte: TEC-FAPEMIG 4292/2007) em operação contínua.

Nesta etapa do trabalho, foi considerado que água fria vinda da rede pública (F) estaria sempre chegando à temperatura de aproximadamente 22°C. Da mesma forma, foi considerado que o Coletor estaria sujeito a uma insolação constante, de forma que o fluido ao passar por ele retornasse ao *Boiler* (totalmente isolado) numa temperatura de aproximadamente 39°C. Esta temperatura foi escolhida porque representa a temperatura média experimental verificada no interior do *Boiler* durante um dia ensolarado (das 10:00 as 17:00 h), conforme mostra a Figura 2. Além do mais, uma temperatura de 39°C é aquela fornecida pela maioria dos chuveiros elétricos para que o usuário tenha durante o banho uma sensação de conforto e satisfação, pois temperaturas acima deste patamar já seriam desagradáveis porque lhe queimariam a pele, retirando-lhe os principais óleos essenciais.

Para o sistema mostrado anteriormente e ainda considerando uma temperatura média de 39°C, foram feitos balanços de energia para diferentes razões de recirculação – “R”. Definiu-se “R” como a razão entre a taxa mássica que circula pelo coletor - “S” - pela taxa mássica de consumo “C” (água quente disponibilizada ao usuário). Assim, para cada condição operacional, estimou-se, teoricamente, por um balanço de energia no reservatório, a máxima temperatura média que o sistema poderia fornecer ao usuário/consumidor ( $T_E$ ), bem como o tempo necessário ( $t_E$ ) para que tal condição fosse alcançada (estado estacionário), nos termos da Figura 3.

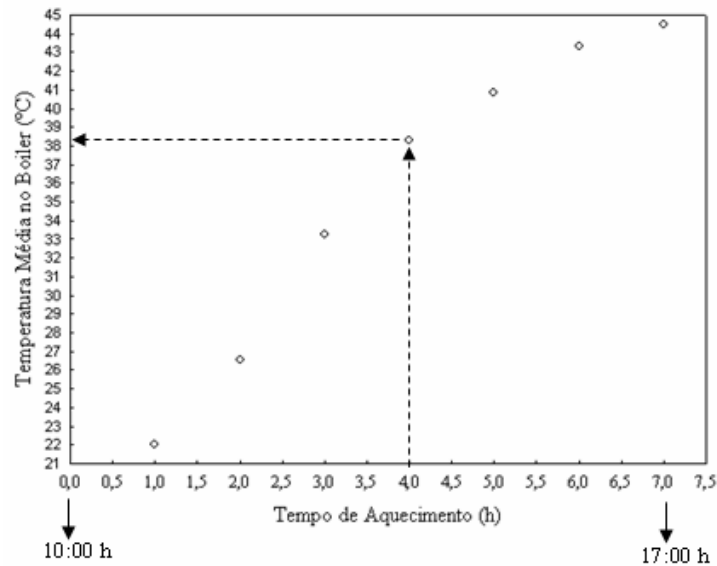


Figura 2: Temperatura média do fluido no interior do *Boiler* medida experimentalmente ao longo de um dia de aquecimento, em batelada e sem consumo (Fonte: TEC/FAPEMIG).

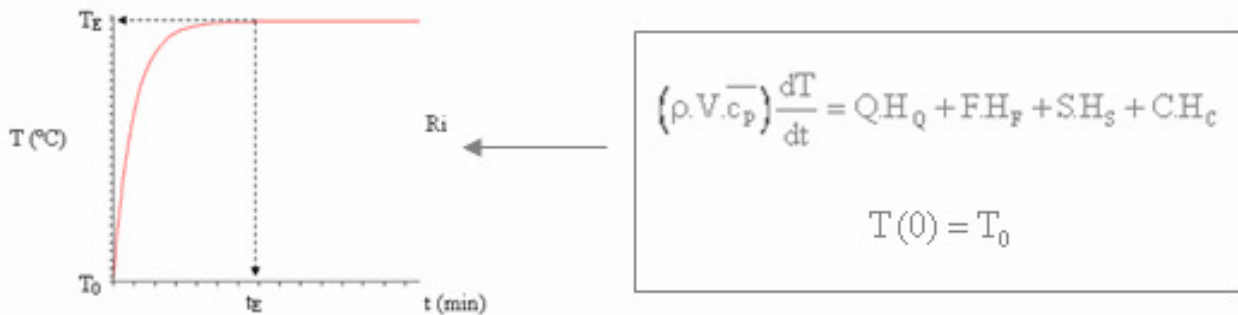


Figura 3: Dinâmica da temperatura do fluido (Balanço de Energia) na corrente de consumo do *Boiler* – “C” - para uma razão de recirculação genérica – “Ri”.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 apresenta as máximas temperaturas ( $T_E$ ) do fluido na corrente de consumo (C) para cada uma das razões de recirculação (R) utilizadas nesta etapa do trabalho, bem como o tempo necessário para que elas sejam atingidas ( $t_E$ ), ambos calculados segundo a metodologia apresentada na Figura 3. Verifica-se que a máxima temperatura do fluido disponível ao usuário (corrente de consumo “C”) é obtida à medida que maiores razões de recirculação (R) são empregadas. Isto é plausível porque em instalações residenciais ou não residenciais, são geralmente utilizadas bombas centrífugas que mantêm uma vazão de recirculação constante no coletor, dando liberdade apenas para modificar a taxa de consumo. Em outras palavras, a Figura 4 mostra que à medida que a taxa

mássica de consumo diminui (menores “C” e, portanto, maiores “R”), a temperatura da água fornecida ao usuário tende a ser maior, pois provavelmente possibilita uma maior estratificação de fluido quente na parte superior do *Boiler*. Tecnicamente falando, constata-se ainda pela Figura 4 que Razões de Recirculação (R) acima de “1,1” conseguiriam fornecer continuamente “água quente” ao usuário porque o consumo manter-se-ia em patamares em que a estratificação das camadas de fluido seria preservada (ausência de turbulência capaz de proporcionar mistura intensa entre porções do fluido do topo e fundo do *Boiler*). A Figura 4 também mostra que na prática, o sistema proposto neste estudo jamais alcançaria o estado estacionário por limitações climáticas. Verifica-se que para atingir a máxima temperatura (39°C), seriam necessárias aproximadamente 14 horas de radiação solar (algo impossível porque um dia limpo e ensolarado teria no máximo 8 horas de radiação solar). Felizmente, esta constatação não traz maiores preocupações aos usuários porque, no cotidiano, as unidades de aquecimento solar instaladas em residências, instituições e comércios são providas de mais de uma placa coletora conjugadas e o consumo de “água quente” pelos usuários (C) é quase sempre efetuado de maneira intermitente.

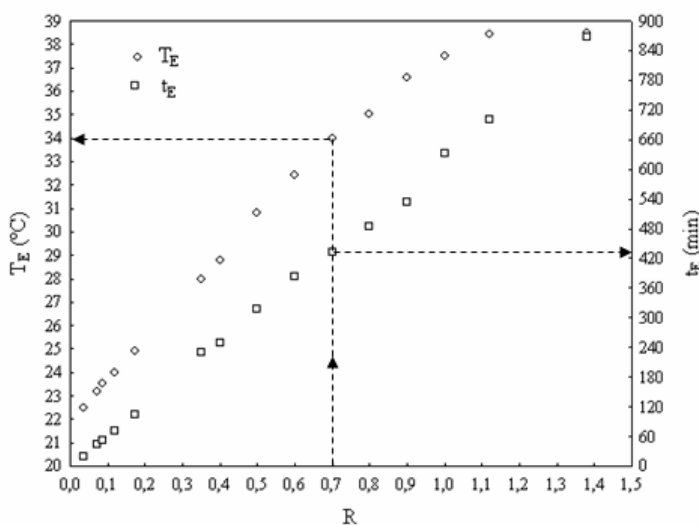


Figura 4: Tempo necessário ( $t_E$ ) para que a temperatura do fluido na corrente de consumo atinja o estado estacionário ( $T_E$ ) em função de diferentes Razões de Recirculação (R) no Coletor.

Na sequência, considerando que o consumo de “água quente”, na maioria das situações, é intermitente, foi feito um estudo teórico da dinâmica da temperatura do fluido no *Boiler* (totalmente isolado), desconsiderando qualquer consumo de “água quente” e qualquer entrada de “água fria” no reservatório. O sistema em comento poderia ser representado por meio da Figura 5.

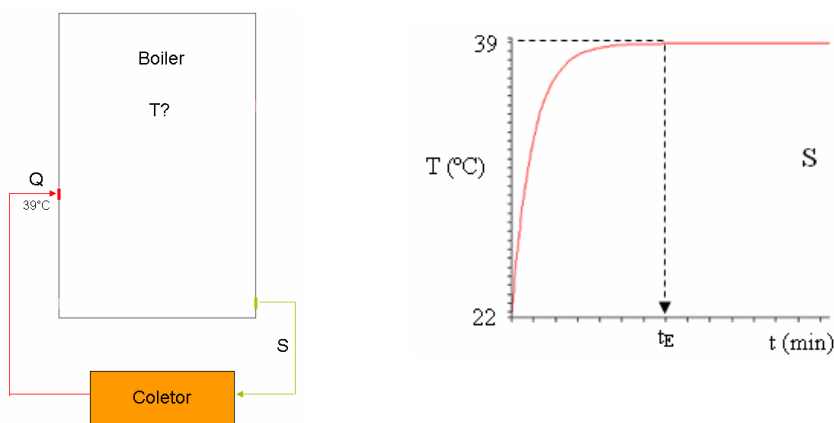


Figura 5: Representação esquemática do Sistema ASBC (*Boiler* de 90 L) em batelada e comportamento da temperatura média do fluido no interior do reservatório em face da taxa mássica que escoo pelo coletor (“S”).

A partir do sistema de aquecimento mostrado na Figura 5 (batelada), um balanço de energia foi feito novamente a fim de estimar, teoricamente, o tempo necessário ( $t_E$ ) para que o reservatório atingisse a temperatura de 39°C em face de diferentes taxas mássicas “S” que poderiam escoar pela placa coletora, conforme ilustra a Figura 6.

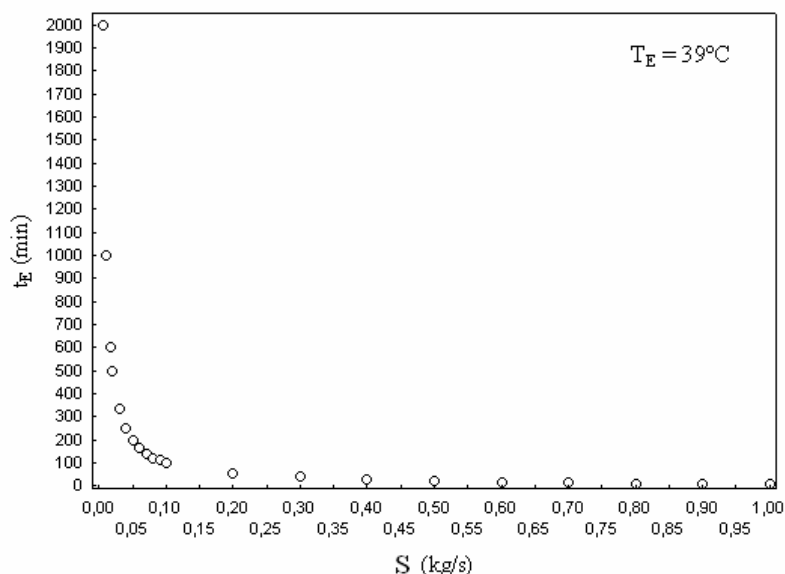


Figura 6: Tempo previsto ( $t_E$ ) para que o fluido no interior do *Boiler* atinja uma temperatura média de 39°C, operando em batelada a diferentes taxas mássicas de escoamento pelo coletor (“S”).

De acordo com a Figura 6 verifica-se que, à medida que se aumenta a taxa mássica de fluido que escoar pelo coletor – “S”, há uma redução do tempo necessário para que o sistema de aquecimento solar atinja o seu estado estacionário (39°C). A justificativa para este comportamento é no sentido de que maiores razões de recirculação proporcionam maiores números de Reynolds e, conseqüente, maiores coeficientes convectivos de troca térmica entre a placa coletora e o fluido que por ela circula. A Figura 6 ainda mostra que taxas mássicas a partir de 0,20 kg/s fazem com que o sistema atinja rapidamente a faixa de temperatura desejada (39°C). No entanto, deve-se ressaltar que taxas mássicas acima deste patamar favorecem o aquecimento do fluido, mas, em contrapartida, majora a perda de carga nos canais da placa coletora, requerendo um sistema de bombeamento mais robusto (maior gasto de energia elétrica). Além disso, taxas mássicas acima de 0,20 kg/s certamente perturbariam a estratificação do fluido no interior do *Boiler* – situação desfavorável ao usuário.

Os balanços energéticos representados pelas Figuras 4 e 6 mostram apenas o tempo necessário para que a temperatura média do fluido no *Boiler* (sistema batelada) ou na saída/consumo (sistema contínuo) fosse estabilizada. Salvo os casos em que o escoamento é turbulento e ocorre mistura intensa no volume do *Boiler*, sabe-se que sistemas desta natureza geralmente conduzem a uma estratificação do fluido ao longo da altura do reservatório, fenômeno este não previsto pela metodologia até então empregada. Para tanto, com o intuito de complementar as informações até então obtidas, técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) foram utilizadas nesta etapa do trabalho para prever a distribuição do fluido a diferentes temperaturas no interior do *Boiler*, considerando um sistema de aquecimento que opera continuamente. Nas simulações fluidodinâmicas efetuadas, foram utilizadas: uma razão de circulação no coletor de 17 g/s, “água fria” entrando à 22°C e água do Coletor para o *Boiler* chegando à 39°C, operando em estado estacionário para diferentes valores de “R” (razão de recirculação). Os perfis de temperatura simulados no interior do *Boiler* podem ser visualizados pela Figura 7.

As simulações fluidodinâmicas mostraram que há uma estratificação térmica do fluido no interior do *Boiler* para a maioria das razões de recirculação ( $2,0 \leq R \leq 0,20$ ). Tal fato é positivo porque o usuário terá sempre o fluido mais quente disponível na parte superior do *Boiler* (vale lembrar que a captação para o consumo é feito no topo do reservatório).

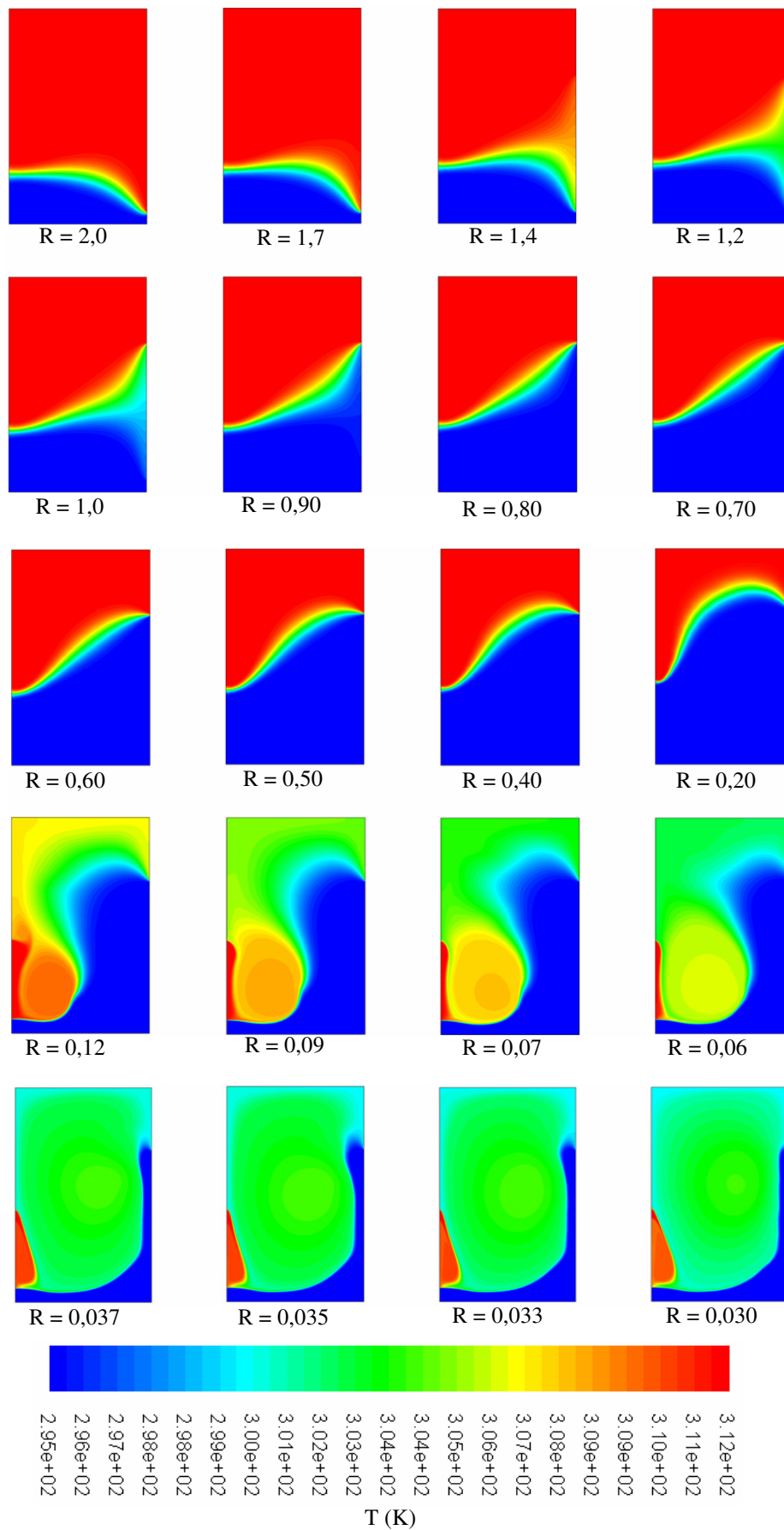


Figura 7: Perfis de Temperatura no interior do *Boiler* em função de “R” – regiões de estratificação do Boiler.

O comportamento descrito anteriormente é ainda interessante porque a água fria ficará depositada no fundo do *Boiler*, sendo encaminhada diretamente para a placa solar coletora (na placa haverá maiores gradientes térmicos, favorecendo a transferência de calor). Por outro lado, razões de recirculação menores do que 0,2 podem comprometer o desempenho do *Boiler* porque a estratificação térmica fica aniquilada. Para  $R < 0,2$  começa haver uma mistura intensa de várias porções de fluido no interior do reservatório em face da turbulência causada pela grande quantidade de “água fria” (22°C) que entra para suprir a demanda de “água quente” retirada pelo usuário.

Para cada uma das simulações contidas na Figura 7, há uma temperatura média do fluido fornecida na corrente de consumo do *Boiler*. Esta temperatura média pode ser obtida mediante a integração do perfil térmico ao longo da fronteira de saída, conforme é ilustrado genericamente na Figura 8.

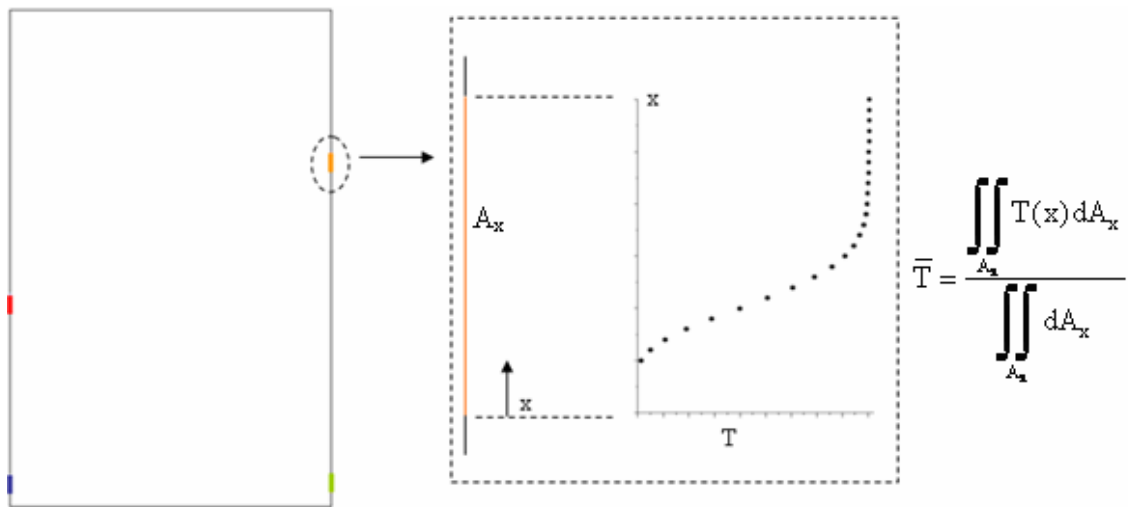


Figura 8 – Perfil de temperatura e temperatura média do fluido ao longo do duto da corrente de consumo do *Boiler*.

Os valores médios de temperatura na corrente de consumo, obtidos por meio das técnicas de CFD e da metodologia apresentada na Figura 8, estão contidos na Figura 9.

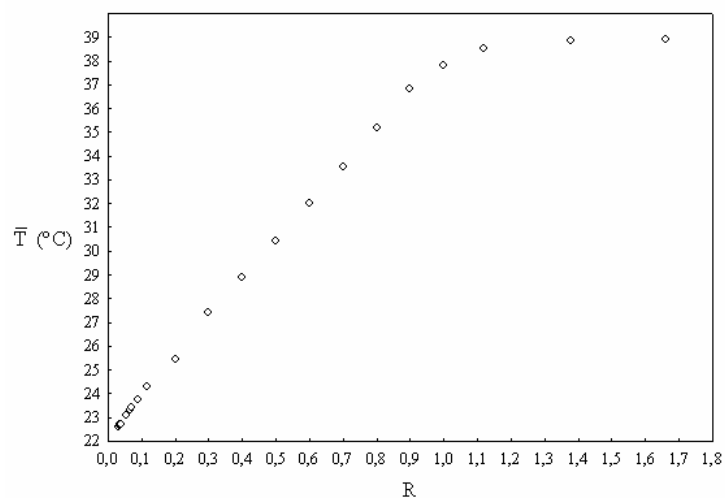


Figura 9 – Temperatura Média do Fluido disponível ao usuário (corrente de Consumo “C”) obtida por meio das técnicas de CFD em face de distintas “R”.

De acordo com a Figura 9, as simulações em CFD levaram aos mesmos resultados dos balanços energéticos apresentados e discutidos nas Figuras 4 e 6. Significa dizer que as técnicas em fluidodinâmica computacional além de preverem satisfatoriamente a temperatura média disponível ao usuário na corrente de consumo, puderam ainda prever como o fluido se estratificava no interior do *Boiler*. Tal predição é de suma importância, pois informações desta natureza podem subsidiar os projetos de engenharia em aquecimento solar, tais como o local mais adequado para a instalação das entradas e saídas, tamanho do boiler, disposição horizontal ou vertical do *boiler* etc.

#### 4. CONCLUSÕES

As simulações fluidodinâmicas mostraram que as técnicas de CFD podem ser uma interessante ferramenta no projeto e otimização dos componentes de um aquecedor solar. Juntamente com os balanços de energia, este trabalho mostrou que há taxas de consumo adequadas para manter o interior de um boiler com camadas térmicas estratificadas de fluido, a fim de que o usuário não sofra limitação de água quente. Os estudos fluidodinâmicos mostraram que taxas de recirculação menores do que 0,20 podem comprometer a estratificação do fluido no boiler por causa da turbulência causada pelo escoamento e mistura com água fria. Por sua vez, desde que o coletor solar esteja trabalhando em condições estacionárias, uma taxa de recirculação a partir de 1,1 garantiria uma estratificação também permanente e fornecimento contínuo de água à temperatura de um confortável banho (39°C).

#### 5. SIMBOLOGIA

$A_x$  – área da seção reta do duto de consumo ( $m^2$ );  
 $C$  – taxa mássica de água quente retirada do boiler pelo usuário (g/s);  
 $c_p$  – calor específico médio da água (J/kg.°C);  
 $F$  – taxa mássica de água fria alimentada no *boiler* em virtude da retirada de água quente (g/s);  
 $H_C$  – entalpia média do fluido na corrente “C” (J/g);  
 $H_F$  – entalpia média do fluido na corrente “F” (J/g);  
 $H_S$  – entalpia média do fluido na corrente “S” (J/g);  
 $H_Q$  – entalpia média do fluido na corrente “Q” (J/g);  
 $R$  – taxa de recirculação definida como a razão entre “S” e “C”  
 $S$  – taxa mássica de água que sai do boiler em direção do coletor solar (g/s);  
 $t$  – tempo (h);  
 $t_E$  – tempo necessário para que o boiler opere em condições estacionárias (h);  
 $T$  – temperatura do fluido (°C);  
 $T_E$  – temperatura média alcançada num sistema que opera em estado estacionário (°C);  
 $Q$  – taxa mássica de água que sai do coletor solar e retorna para o *boiler* (g/s);  
 $V$  – volume do boiler (L);

#### 6. AGRADECIMENTOS

Os autores de trabalho agradecem a FEQUI/UFU, PROPP/UFU, FAPEMIG e CNPq pelo apoio institucional e financeiro que garantiu a execução e conclusão da Iniciação Científica.

#### 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Besteti, M.D.; Azevedo, C.G.; Siqueira, D.A.; Damasceno, J.J.R. and Vieira, L.G.M., 2008, “Analysis and Performance the LCSH System”. In: ENCIT 2008 - 12th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences, Proceedings of ENCIT 2008, v.1.



Lima, J.B.A., 2003, “Otimização de sistema de aquecimento solar de água em edificações residenciais unifamiliares utilizando o programa TRNSYS”, Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 123.  
Pereira, R.C., 2006, “Eficiência Térmica de Coletores Solares de Baixo Custo”, XVII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, PR, Novembro.  
Fluent I., 2009, “Fluent 12.0.3 User’s Guide”.

## STUDY OF THERMAL STRATIFICATION OF A BOILER FOR DOMESTIC WATER HEATING

**Ana Cláudia Ferreira Mendes, Luiz Gustavo Martins Vieira**

Federal University of Uberlândia, Chemical Engineering School, Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Campus Santa Mônica, CEP 38400-900, Uberlândia, MG, Brazil.

e-mails: [anaclaudia\\_88@equi.ufu.br](mailto:anaclaudia_88@equi.ufu.br), [luizgustavo@feq.ufu.br](mailto:luizgustavo@feq.ufu.br)

***Resumo:** The region of the Triângulo Mineiro has a privileged geographical location which provides year-round an excellent solar radiation. It is also one of the biggest costs to pay the electric bill is related to heating water for showers, kitchen or laundry. The conversion of solar radiation into heat is traditionally done by means of solar collectors in which a fluid is its internal energy increased, which is reflected also show increases in temperature. Is not enough solar energy is only collected, but also stored. Traditionally, the storage of solar energy converted into heat is made in tanks lined with insulation (boilers). This paper aims to study the dynamics of stratification of water temperature in a boiler in FEQUI/UFU through the computational fluid dynamics techniques. The fluid-dynamic simulations showed rates of mass consumption that is possible to maintain the stability of stratification in the boiler to supply of hot water.*

***Palavras-chave:** CFD, solar energy, boiler, stratification, temperature.*