

APRIMORAMENTO DE AQUECEDORES SOLARES DE BAIXO CUSTO

NATÁLIA MAIRA BRAGA OLIVEIRA¹, JOÃO JORGE RIBEIRO DAMASCENO², LUIZ GUSTAVO MARTINS VIEIRA³

RESUMO: Sabe-se que o sol é uma fonte de energia renovável. A energia solar é transmitida por radiação e não polui o meio ambiente uma vez que não libera gases tóxicos durante sua coleta. Uma forma comum de aproveitamento desse potencial energético é através do uso de energia térmica para aquecimento de água em chuveiros, sendo comum o uso de aquecedor solar. Um aquecedor solar é composto basicamente pela placa coletora e um reservatório (*boiler*). Nos últimos anos a ONG Sociedade do Sol tem proposto a utilização de um aquecedor solar alternativo, intitulado de Aquecedor Solar de Baixo Custo (ASBC). O ASBC tem o coletor solar confeccionado a partir de materiais poliméricos, cujo desempenho é similar ao aquecedor convencional (coletor metálico) e os custos de instalação e construção são menores. Diante disto, o objetivo desse trabalho foi comparar o desempenho de dois aquecedores alternativos (coletores de PVC e polipropileno) nas mesmas condições operacionais de um aquecedor convencional (coletor de cobre). Para tanto, medidas experimentais foram realizadas nas três modalidades de aquecedores, em que foram analisadas as distribuições de temperaturas e o tempo de resposta para se alcançar as melhores condições de consumo. De acordo com os estudos realizados, foi possível verificar que os aquecedores de baixo custo possuem potencialidade de utilização, posto que nas mesmas condições operacionais do aquecedor convencional, apresentaram praticamente os mesmos valores de temperatura. Foi possível concluir ainda que os aquecedores solares de baixo custo são tecnicamente viáveis para o aquecimento doméstico de água.

Palavras chave: aquecedor solar, ASBC, energia solar, tecnologia termossolar.

¹ Aluna de Iniciação Científica, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco K, Uberlândia - MG, CEP: 38.408-100, email: nataliaoliveira.eq@gmail.com.

² Co-orientador, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco K, Uberlândia - MG, CEP: 38.408-100, email: jjrdamasceno@ufu.br.

³ Orientador, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco K, Uberlândia - MG, CEP: 38.408-100, email: luizgustavo.ufu@gmail.com.

ABSTRACT: It is known that the sun is a source of renewable energy. Solar energy is transmitted by radiation and does not pollute the environment since it does not release toxic gases during its collection. A common way to use this potential energy is through the use of thermal energy for heating water in showers, and common use of solar. A solar heater is basically composed by the collector plate and a tank (boiler). In recent years the ONG Society of the Sun has offered the use of a solar alternative, titled Solar Heater Low Cost (ASBC). The ASBC is the solar collector manufactured from polymeric materials, whose performance is similar to conventional heater collector (metal) and the cost of installation and construction are smaller. Facing this, the objective of this study was to compare the performance of two alternative heaters (collectors PVC and polypropylene) in the same operating conditions of a conventional heater collector (copper). To this end, experimental measurements were performed on three types of heaters, it analyzed the distributions of temperature and response time to achieve the best conditions for consumption. According to studies, it was possible that the low cost heaters have potential use, since the same operational conditions of conventional heating, showed almost the same temperatures. It was still possible to conclude that the solar water heaters are low cost technically feasible for heating domestic water.

Key words: solar heater, ASBC, solar energy, solar thermal technology.

1. INTRODUÇÃO

O sol é fonte de energia limpa, renovável, segura e barata. O aproveitamento de sua luz e calor é uma das alternativas energéticas mais promissoras para os próximos anos. Como aplicação prática da energia solar tem-se o aquecimento de água para fins residenciais, utilizando para isso aquecedores solares que transformam a luz solar em calor. Esta tecnologia representa benefícios econômicos, ambientais e sociais (Projeto ASBC, 2009).

O aquecimento de água na maioria das residências brasileiras é feito por chuveiros elétricos, equipamentos de grande consumo de energia elétrica e geradores de importantes demandas de capital para o setor elétrico (Pereira *et al.*, 2006 b). Sendo assim, a tecnologia termossolar apresenta benefícios sociais, tais como: redução da conta de energia elétrica; criação de empregos por unidade de energia transformada; descentralização da geração de energia; e comercialização de certificados de redução de emissões de carbono. Além disso, o aumento na utilização de aquecedores solares pode incorporar vantagens para as distribuidoras de energia elétrica, como a diminuição da inadimplência, a melhoria da qualidade do serviço, a melhoria da imagem das empresas e o deslocamento de carga do pico de demanda (Siqueira, 2009). Do ponto de vista ambiental, a utilização da tecnologia termossolar contribui para diminuição do ritmo de aumento da temperatura da camada atmosférica, através da redução das emissões de gás carbônico, provenientes das fontes de energia convencionais (Rodrigues e Matajs, 2005).

Os aquecedores solares são constituídos basicamente de uma placa coletora solar e de um reservatório (*boiler*). O coletor é a parte do aquecedor responsável pela captação da energia solar e transformação dela em calor, bem como a transferência do calor para a água de uso (Jurado, 2004). Já o boiler é um tanque termicamente isolado que armazena a água aquecida durante o dia na placa coletora, usado para garantir o suprimento noturno de água quente assim como nos dias chuvosos. Adicionados a estes itens têm-se as tubulações e conexões, podendo possuir ou não uma fonte auxiliar de energia. Como ilustra a Figura 1, a água de alimentação do sistema entra no *boiler*, segue para as placas coletoras, onde é aquecida, e retorna ao *boiler*, ficando armazenada até o seu consumo.

Os aquecedores convencionais têm uma placa coletora feita de metal condutor (cobre, alumínio, ferro ou aço), assim como os canais pelos quais a água escoar. Da mesma forma o *boiler* e demais acessórios são também metálicos (Cristofari *et al.*, 2002). O *boiler*, parte integrante do sistema de maior custo, é feito de materiais como alumínio, cobre ou aço inox

com duas superfícies cilíndricas, uma interna e outra externa, sendo adicionado entre elas geralmente materiais de baixa condutividade térmica, como lã de vidro ou espuma de poliuretano, para diminuição das perdas térmicas para o ambiente.

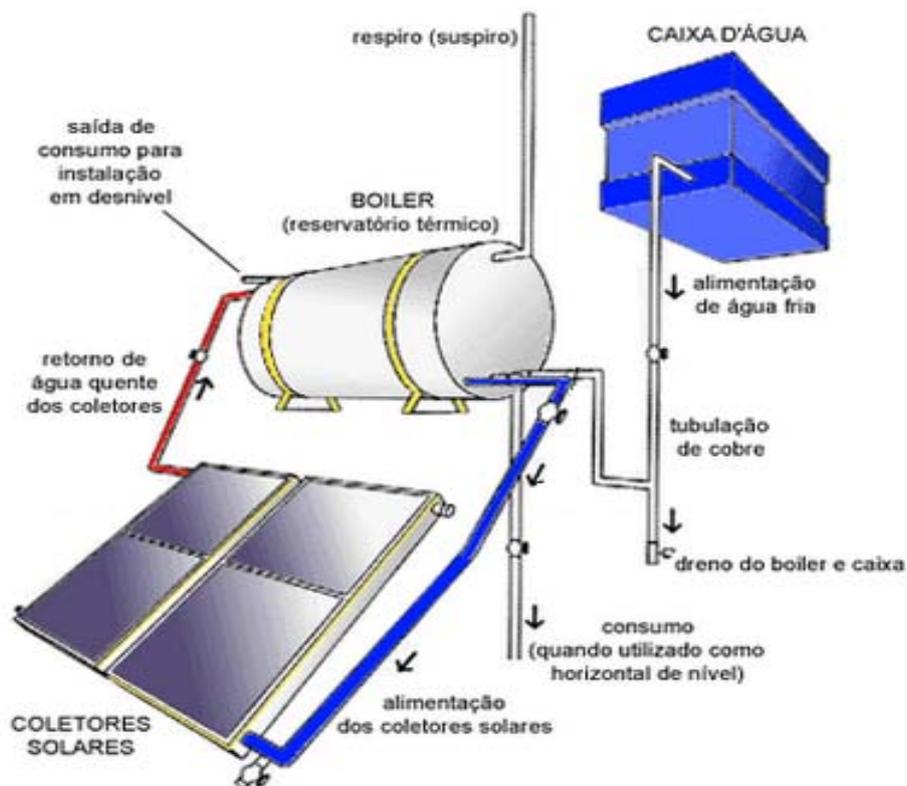


Figura 1 - Sistema de aquecimento solar de água convencional.

A água quente é mais leve do que a água fria e isto permite a estratificação da água, desde que não tenha turbulência. Entretanto, ao longo do tempo, mesmo sem turbulência, devido à difusão, o calor da parte superior da caixa vai sendo lentamente transferido para a parte inferior, terminando com uma completa homogeneização da temperatura da água.

Os aquecedores de água podem ser ativos ou passivos. O sistema passivo, também conhecido como termossifão, é baseado na diferença de densidade da água a temperaturas diferentes. Nesse sistema a vazão é proporcional à radiação solar e a circulação da água só será interrompida quando a intensidade de radiação for insuficiente para manter a temperatura da água a níveis diferentes ou quando for alcançado o equilíbrio térmico entre o coletor e o tanque de estocagem de água quente. Já a instalação em circulação forçada difere apenas pela introdução de uma bomba elétrica no circuito do coletor para circulação de água no mesmo, permitindo assim instalar o tanque de estocagem de água quente abaixo do coletor.

Coletores solares devem ter alta transmissividade e absorvidade da radiação e é desejável que a emitância da superfície seja a mais baixa possível para reduzir as perdas.

Além das propriedades ópticas dos materiais que constituem um coletor, outros fatores também afetam o desempenho do mesmo, como o ângulo de inclinação e *layout*, a quantidade de energia solar disponível no local e a temperatura da água na entrada do sistema.

Os principais componentes de um coletor solar plano convencional para aquecimento de água são: vidro, tubo de cobre, chapa de alumínio enegrecido e isolante térmico (poliuretano expandido ou lã de vidro). Os coletores com placa absorvedora em cobre, que possui alta condutividade térmica, permitem obter temperaturas elevadas (da ordem de 80°C), quando bem projetados, e têm uma vida útil estimada em vinte anos, mas apresentam um custo de aquisição elevado (Bezerra, 1998).

Recentemente, estudos mostram que ao invés de condutores, materiais alternativos e não condutores podem ser perfeitamente utilizados na operação de aquecedores solares (Kudish *et al.*, 2002). A partir desta nova concepção, os aquecedores solares passaram a ser denominados de Aquecedores Solares de Baixo Custo, ou simplesmente, ASBC, haja vista que há o uso de materiais alternativos (polímeros) para os coletores e os *boilers*, facilitando a construção e diminuindo o custo de fabricação, além de representar uma alternativa para diminuir o consumo de energia elétrica utilizada no aquecimento de água. Considera-se ainda a possibilidade de ser projetado um aquecedor solar de baixo custo com uma eficiência menor se o custo do mesmo for significativamente reduzido.

O projeto do Aquecedor Solar de Baixo Custo (ASBC) tornou-se patente pleiteada pela Sociedade do Sol - uma Organização Não Governamental de caráter socioambiental, atuante no Centro Incubador de Empresas Tecnológicas (CIETEC), localizada no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), no *campus* da Universidade de São Paulo (USP) - que cedeu todas as prerrogativas de fabricação, uso e estudo a qualquer pessoa física ou jurídica, sem fins lucrativos, que vê a energia solar como uma das alternativas para a demanda energética futura e que se preocupa com a preservação ambiental (Projeto ASBC, 2009).

Vários fatores cooperam no Brasil para a criação e operação econômica do ASBC: altas temperaturas médias diárias e farta iluminação solar bem distribuída durante o ano, o que permite o uso de coletores muito simples (Pereira *et al.*, 2006 a; Rísoli, 2008); a presença de caixa de água no forro da maioria das casas brasileiras (sinônimo de baixa pressão para o reservatório térmico); o fato dessa tecnologia ter abrangência e uso nacional, pela simplicidade e baixo preço; o uso do PVC, material fácil de ser encontrado; a presença na maioria das casas brasileiras do chuveiro elétrico que pode ser utilizado como aquecedor de apoio em dias nublados.

O sistema ASBC (Figura 2) tem o mesmo princípio de funcionamento do sistema convencional de aquecimento solar de água, podendo funcionar em regime de termossifão ou bombeado. A placa coletora é mais simples, sem cobertura de vidro e caixa retangular. A ausência de cobertura transparente no coletor, apesar de diminuir a atuação do coletor em dias de muito vento, ela é necessária para não degradar o material devido às altas temperaturas proporcionadas pelo efeito estufa (Siqueira, 2009).

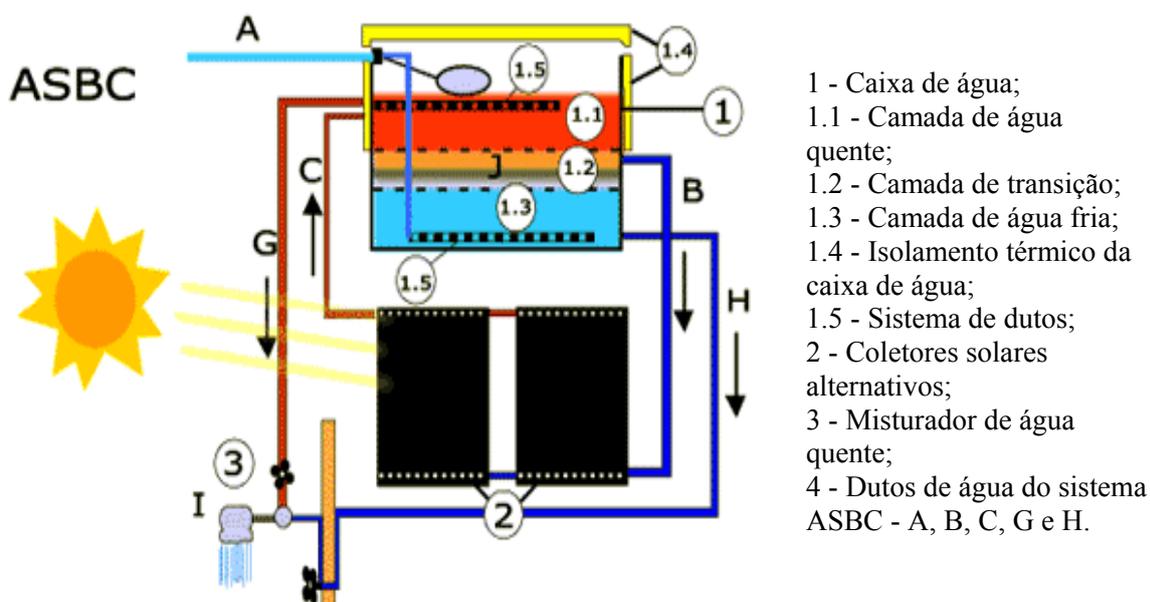


Figura 2 – Esquema do ASBC de 200 L com seus componentes (Projeto ASBC, 2009).

A placa coletora em um ASBC é composta por um perfil de forro alveolar de PVC modular com tubos de PVC acoplados às suas extremidades e isolamento no fundo desta placa. A placa é pintada com tinta preta fosca para aumentar a absorção da energia solar. Com relação ao reservatório do sistema alternativo, pode-se utilizar a própria caixa d'água da residência, tambores de plástico rígido ou em fibra de vidro com baixa condutividade térmica, ou caixa de EPS (isopor), sempre isolados termicamente nas laterais e na tampa superior com materiais simples e baratos como isopor, lã de vidro, poliuretano, e até mesmo madeira, jornal ou cobertores velhos.

O projeto de disseminação de ASBC se destaca pelo seu grande potencial, despertando, ao mesmo tempo, o respeito à natureza e o senso de civilidade. A difusão de alternativas tecnológicas e sociais eficientes para a utilização de recursos naturais em prol do uso de aquecedores solares de baixo custo, assim como realizado pela Sociedade do Sol, torna incontestável a relevância deste trabalho (Canal Ciência, 2010).

Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho é comparar o desempenho de aquecedores solares de baixo custo com o de um aquecedor solar convencional. A

comparação destes sistemas de aquecimento será feita pela análise de desempenho térmico dos mesmos, levando em conta a eficiência, o tempo que cada tipo de aquecedor solar necessita para atingir uma determinada temperatura e o valor da temperatura máxima alcançada, com os sistemas trabalhando em regimes de circulação natural (termossifão) e forçada (bombeado).

Além disso, através do uso de fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*), o trabalho pretende obter particularidades do escoamento dentro do ASBC, a fim de auxiliar o entendimento e aprimoramento do sistema, tornando-o mais eficiente e acessível às famílias de menor renda.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os principais materiais e métodos utilizados para cumprir o objetivo deste trabalho.

Coletores solares de diferentes materiais foram estudados com os sistemas operando em escoamento passivo (natural) e ativo (bombeado). A operação foi batelada e o comportamento contínuo foi previsto por meio de técnicas de fluidodinâmica computacional.

2.1. Unidade Experimental

Uma bancada de ensaios para os coletores solares e reservatórios foi montada no *campus* da Universidade Federal de Uberlândia avaliando a eficiência de três sistemas, dois de baixo custo e um convencional, com medidas de radiação solar incidente e de temperatura da água, com os sistemas trabalhando naturalmente (termossifão) e bombeados.

No ASBC, a placa do coletor, que absorve a energia solar e a transfere para a água na forma de calor, é formada por perfis planos de PVC rígido e sem cobertura. Outra opção de coletor solar que foi utilizada é a placa de polipropileno (PP) sem cobertura, que é um material com aditivo anti-UV, que assim como a placa de PVC teve seu desempenho térmico analisado neste trabalho. O reservatório térmico de cada um dos dois coletores é de polietileno revestido por isopor, responsável por armazenar a água aquecida durante o dia. Além disso, tem-se um sistema de aquecimento convencional instalado na unidade experimental utilizado como padrão comparativo. O sistema convencional é formado por coletor de cobre recoberto por uma cobertura de vidro e um reservatório de aço inoxidável isolado com poliuretano expandido rígido.

A Figura 3 apresenta uma fotografia da unidade experimental, sendo:

- 1 – Coletor solar de forro de PVC;
- 2 – Coletor solar de cobre;
- 3 – Coletor solar de PP;
- 4 – Reservatório de água fria (caixa d'água de fibra de vidro com volume de 310 L);
- 5 – Reservatório de água quente do coletor de PVC (volume de 90 L);
- 6 – Reservatório de água quente do coletor de cobre (reservatório convencional com volume de 100 L);
- 7 – Reservatório de água quente do coletor de PP (volume de 90 L).



Figura 3 - Unidade experimental instalada no bloco da FEQUI - UFU.

Para a obtenção de medidas precisas de temperatura dos sistemas de aquecimento estudados foi necessário utilizar um sistema de monitoramento e aquisição de dados em tempo real, realizado através de sensores de temperatura, que foram interligados a um computador no qual esses sinais são recebidos e interpretados. O *software* específico para registrar, monitorar e processar dados utilizado foi o Labview.

As medidas de temperatura na entrada e saída dos coletores e nos reservatórios são feitas por termopares do tipo T devidamente calibrados e instalados como mostra a Figura 4 a seguir. Já a temperatura ambiente dentro do *campus* Santa Mônica é medida e divulgada de hora em hora pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (Estações e Dados, 2010).

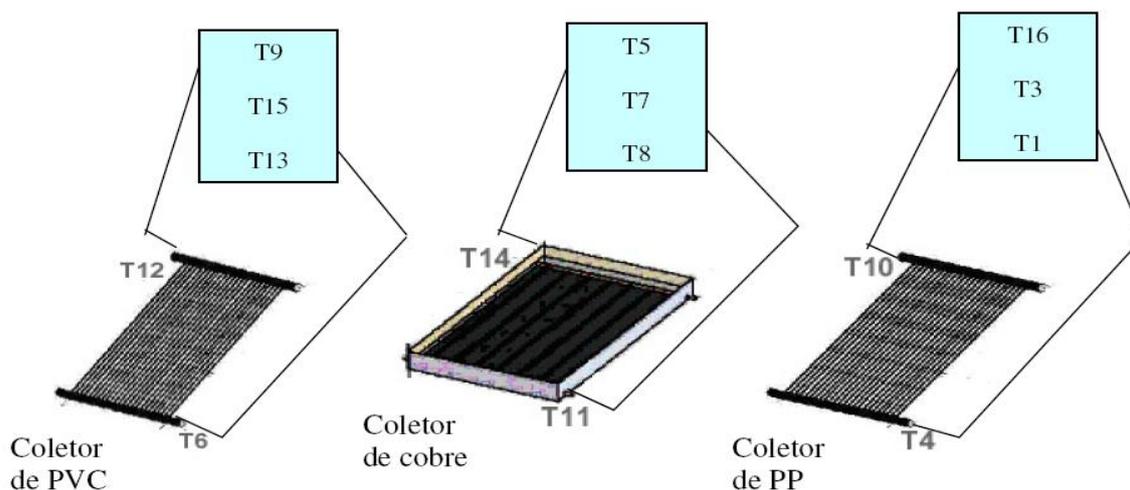


Figura 4: Posição de instalação dos termopares.

Os dados meteorológicos de interesse no estudo de aquecedores solares são velocidade do vento e o fluxo de radiação solar. Tais informações são monitoradas e fornecidas diariamente pela estação meteorológica do Instituto de Geografia da UFU, sendo estas divulgadas pelo INMET (Estações e Dados, 2010).

2.2. Procedimento Experimental

As medidas experimentais foram realizadas em horários pré-determinados (9 às 16 horas) de dias com características parecidas (insolação, quantidade de nuvens, temperatura etc.). Para tanto, cada configuração é toda preenchida com água captada da rede pública e com condições iniciais de temperatura conhecida. Então inicia-se o acompanhamento das variações de temperatura através de termopares localizados em vários pontos do sistema em intervalos de tempo de 15 minutos.

A partir dos dados de temperatura advindos dos termopares é possível obter a temperatura máxima alcançada em cada *boiler* e o tempo necessário para se alcançar essa temperatura.

Nos ensaios com os sistemas de aquecimento solar bombeados foram escolhidos valores de vazão igualmente espaçados dentro da faixa de operação da bomba peristáltica (20 L/h e 40 L/h).

2.3. Metodologia Numérica

Experimentos não foram realizados para o sistema operando de forma contínua, para este caso foram utilizadas técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD). Tais técnicas são ferramentas computacionais importantíssimas à medida que auxiliam no entendimento e

predição de fenômenos e particularidades inerentes ao sistema, os quais são difíceis ou até mesmo impossíveis de prever experimentalmente (Vieira, 2006). As análises se basearam na avaliação das perturbações provadas pela entrada de fluido frio e saída de fluido quente do *boiler*, tendo como objetivo aprimorar o sistema.

As simulações numéricas foram implementadas através do *software* comercial *Fluent*[®], cuja licença fora adquirida pela Faculdade de Engenharia Química da UFU até o ano de 2010. Para que seja possível a simulação via *Fluent*, torna-se necessária a construção de malhas computacionais aplicadas ao sistema de interesse (*boiler* do aquecedor solar de baixo custo), já que as técnicas de CFD requerem a aplicação das *Equações de Transporte* em pequenos volumes de controle que são as células computacionais (Fluent Inc., 2007). Estas malhas são construídas no pré-processador, o *software Gambit*[®], do mesmo fabricante (ANSYS).

As malhas computacionais elaboradas são bidimensionais, retangulares e dotadas de aproximadamente 315000 células computacionais. Depois de construídas as malhas e transferidas para o *Fluent*, algumas informações devem ser fornecidas ao *software*, tais como, tipo de regime de escoamento, modelo de turbulência, métodos de acoplamento, critério de convergência etc. Para este estudo foram realizadas simulações numéricas considerando escoamento laminar, estado estacionário e sistema não isotérmico, sendo água o fluido que escoava. No que se refere aos esquemas de interpolação da pressão foi aplicado o esquema PRESTO! enquanto para o acoplamento do binômio pressão-velocidade foi utilizado o algoritmo SIMPLE. Já os esquemas de interpolação para as demais variáveis fluidodinâmicas foram do tipo UPWIND de primeira e segunda ordem. Em termos de convergência foi utilizado um critério de convergência de 1.10^{-4} . Além disso, a temperatura do fluido frio foi de 295 K (22°C) e do fluido quente foi de 312 K (39°C), enquanto que a taxa mássica de água quente é igual à de água fria correspondendo a 17 g/s.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Operação Batelada

O incremento de temperatura no *boiler* está diretamente ligado à vazão, que para um sistema termossifão é maior quanto maior for a radiação incidente no plano do coletor solar. Assim, foram comparadas as temperaturas nos *boilers* para o sistema termossifão e bombeado.

O volume dos dois reservatórios de baixo custo é de 90 L cada e as medidas de temperaturas dentro do mesmos são feitas em três pontos: a 5 cm do fundo (seção inferior), a 29 cm do fundo (seção intermediária) e a 49 cm do fundo (seção superior).

Foram analisados os dados de seis ensaios realizados nos aquecedores solares em dias ensolarados. Estes ensaios foram todos em regime batelada, sendo: operação em circulação natural (termossifão) no dia 29/07/2009 e 31/07/2009; operação em circulação forçada a 20 L/h no dia 21/07/2009 e 12/08/2009; e operação em circulação forçada a 40 L/h no dia 15/08/2009 e 31/08/2009.

Para os dados de temperatura obtidos foram construídas curvas com o auxílio do *software* Statistica. Tais curvas permitiram analisar o desempenho dos aquecedores. Sendo assim, as Figuras 5.1.a, 5.1.b, 5.2.a, 5.2.b, 5.3.a e 5.3.b mostradas a seguir representam o comportamento do sistema termossifão.

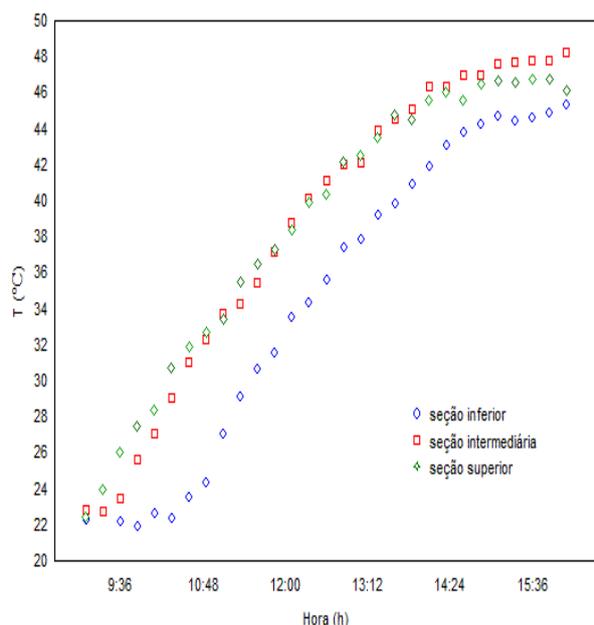


Figura 5.1.a: Temperaturas medidas em 29/07/2009 para o reservatório térmico do coletor de PP, para operação batelada e circulação natural.

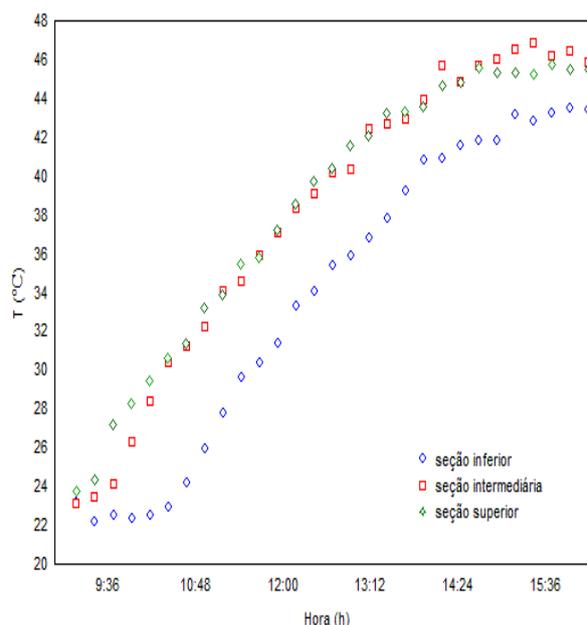


Figura 5.1.b: Temperaturas medidas em 31/07/2009 para o reservatório térmico do coletor de PP, para operação batelada e circulação natural.

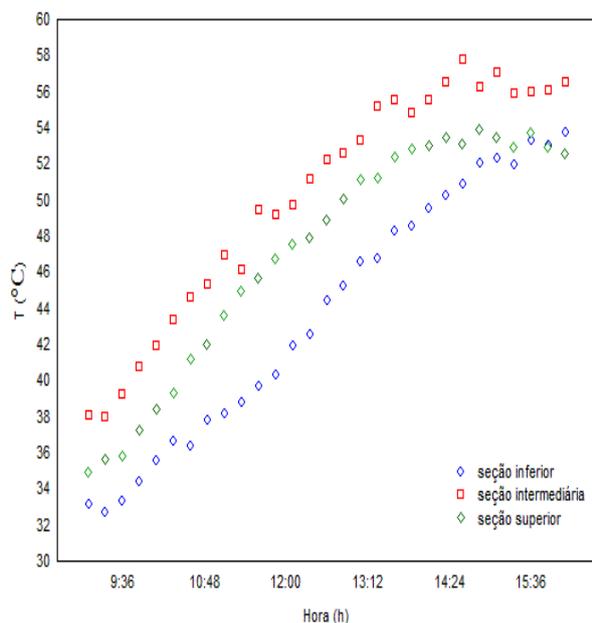


Figura 5.2.a: Temperaturas medidas em 29/07/2009 para o reservatório térmico do coletor convencional, para operação batelada e circulação natural.

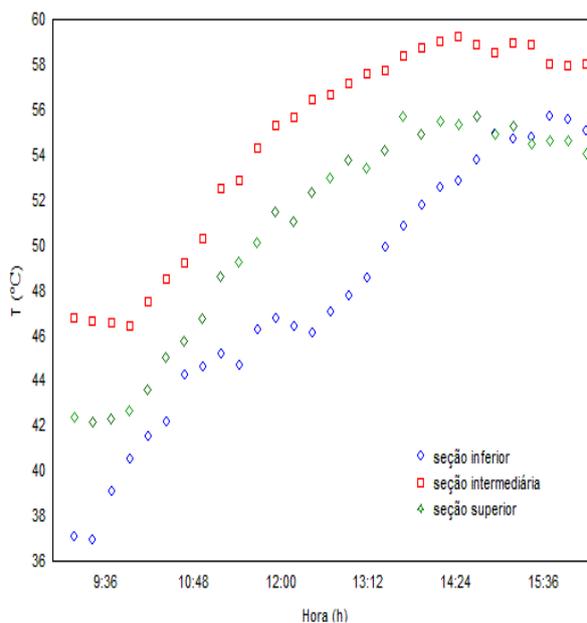


Figura 5.2.b: Temperaturas medidas em 31/07/2009 para o reservatório térmico do coletor convencional, para operação batelada e circulação natural.

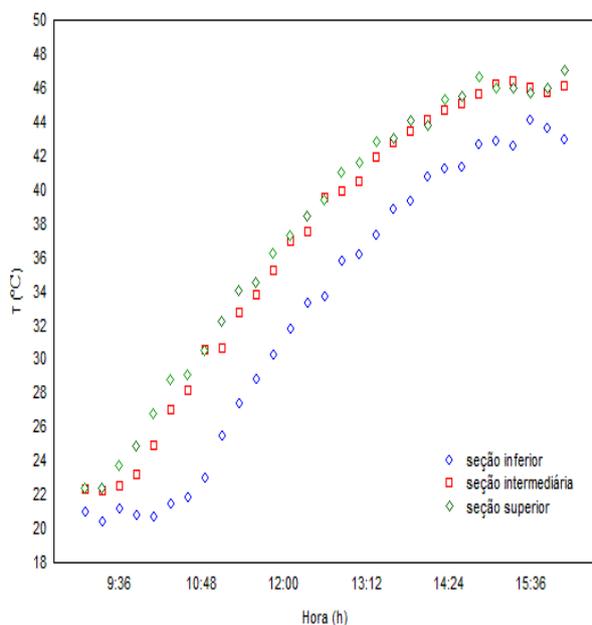


Figura 5.3.a: Temperaturas medidas em 29/07/2009 para o reservatório térmico do coletor de PVC, para operação batelada e circulação natural.

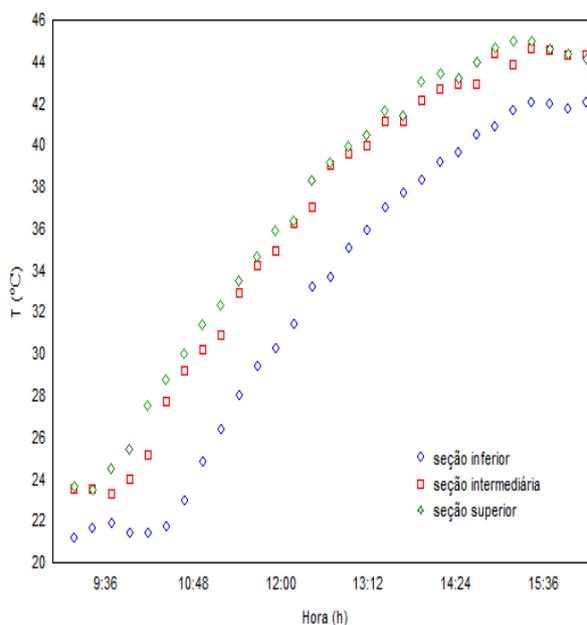


Figura 5.3.b: Temperaturas medidas em 31/07/2009 para o reservatório térmico do coletor de PVC, para operação batelada e circulação natural.

O ensaio em 29 de julho de 2009 foi realizado das 9 às 16 h e pela análise das figuras acima pode se perceber que a maior temperatura atingida pela água nos reservatórios foi: 48°C na região intermediária do reservatório PP; 58°C na região intermediária do reservatório convencional; 47°C na região superior do reservatório PVC. Já o ensaio em 31 de julho de 2009, também realizado no mesmo horário, garante temperaturas máximas nos reservatórios de: 47°C na região intermediária do reservatório PP; 59°C na região intermediária do reservatório convencional; 45°C na região superior do reservatório PVC. Ou seja, o comportamento dos sistemas nos dois dias é bastante similar. Nota-se ainda que a região intermediária e a região superior dos reservatórios PP e PVC apresentam praticamente a mesma temperatura, enquanto que para o reservatório convencional a temperatura da região superior é ligeiramente inferior à temperatura da região intermediária.

As Figuras 6.1.a, 6.1.b, 6.2.a, 6.2.b, 6.3.a e 6.3.b são representativas do sistema operando ativamente com vazão de 20 L/h para PP e PVC e termossifão para o convencional, uma vez que não há bombas instaladas no mesmo para controlar sua vazão.

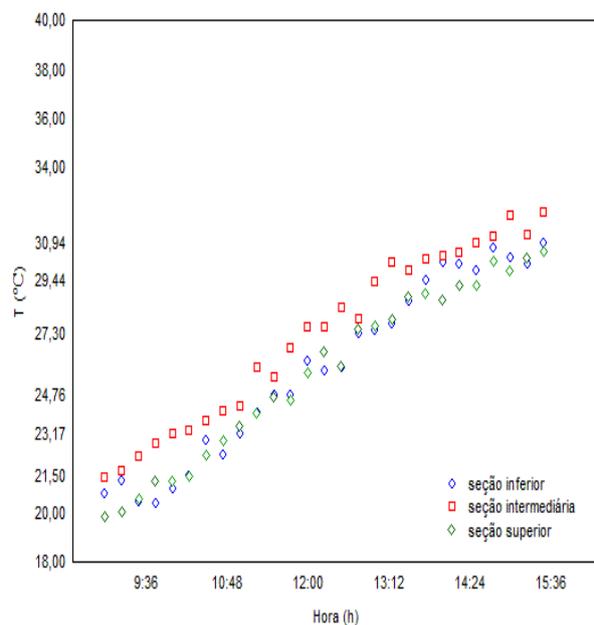


Figura 6.1.a: Temperaturas medidas em 21/07/2009 para o reservatório térmico do coletor de PP, para operação batelada e circulação forçada de 20 L/h.

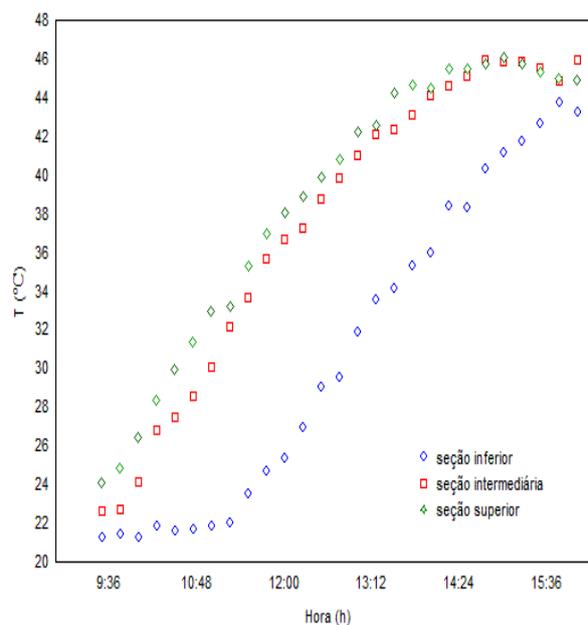


Figura 6.1.b: Temperaturas medidas em 12/08/2009 para o reservatório térmico do coletor de PP, para operação batelada e circulação forçada de 20 L/h.

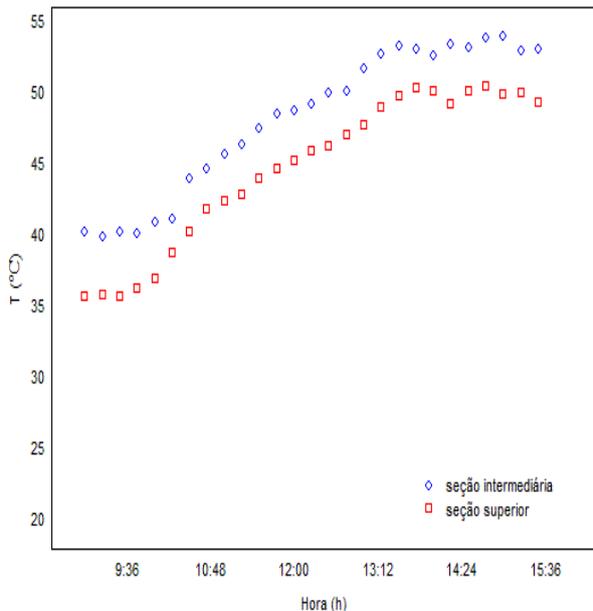


Figura 6.2.a: Temperaturas medidas em 21/07/2009 para o reservatório térmico do coletor convencional, para operação batelada e circulação natural.

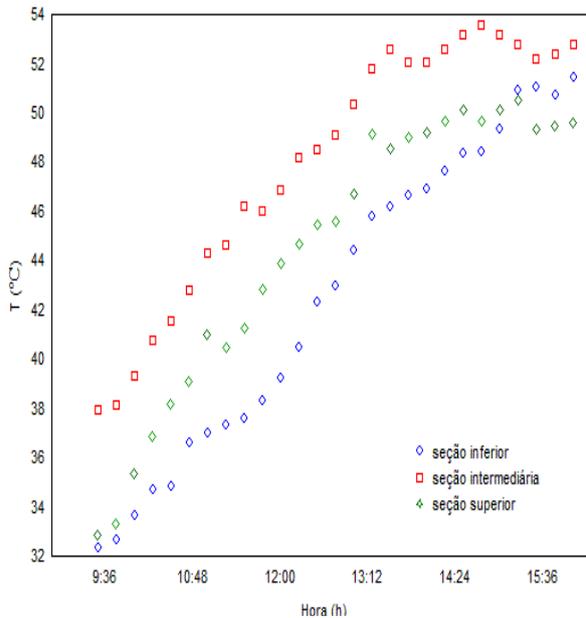


Figura 6.2.b: Temperaturas medidas em 12/08/2009 para o reservatório térmico do coletor convencional, para operação batelada e circulação natural.

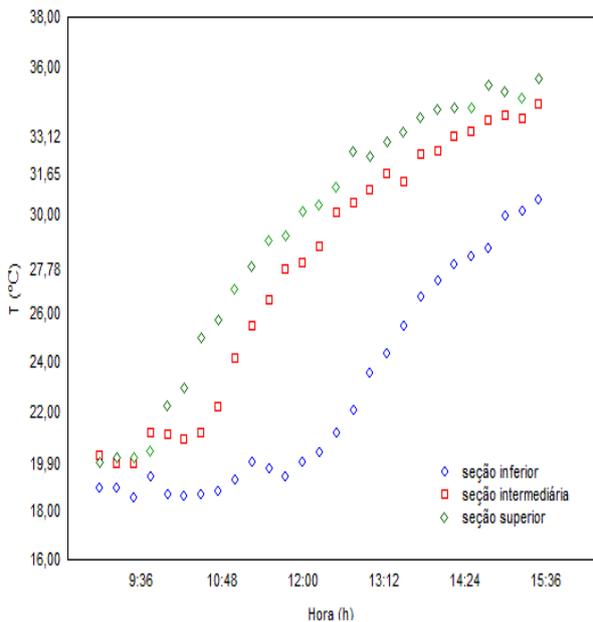


Figura 6.3.a: Temperaturas medidas em 21/07/2009 para o reservatório térmico do coletor de PVC, para operação batelada e circulação forçada de 20 L/h.

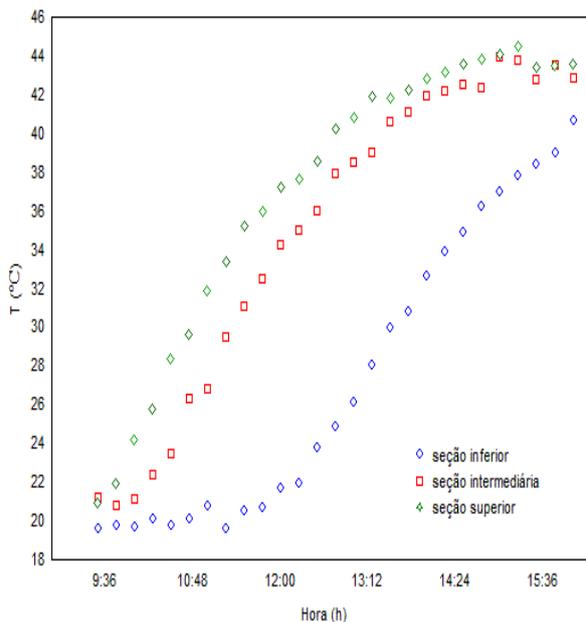


Figura 6.3.b: Temperaturas medidas em 12/08/2009 para o reservatório térmico do coletor de PVC, para operação batelada e circulação forçada de 20 L/h.

No dia 21 de julho de 2009 o ensaio foi realizado entre 9h e 15h30 e pela análise das figuras acima pode se perceber que a maior temperatura atingida pela água nos reservatórios foi: 32°C na região intermediária do reservatório PP; 54°C na região intermediária do reservatório convencional; 35,5°C na região superior do reservatório PVC. Nota-se ainda que no reservatório PP todas as regiões apresentaram aproximadamente a mesma temperatura o que sugere perda da estratificação do *boiler*. No reservatório convencional a região intermediária apresentou temperatura maior que a região superior. Além disso, não foram medidas as temperaturas na região inferior do *boiler* convencional uma vez que o termopar localizado nesta seção estava descalibrado no dia do ensaio. Pode-se perceber ainda que as temperaturas atingidas nos reservatórios PP e PVC são bem menores que a temperatura atingida no reservatório convencional, o que sugere que o bombeamento a 20 L/h prejudicou o desempenho dos ASBC.

No dia 12 de agosto de 2009 o ensaio foi realizado entre 9h30 e 16h e pela análise das figuras 6.1.b, 6.2.b e 6.3.b pode se perceber que a maior temperatura atingida pela água nos reservatórios foi: 46°C na região superior do reservatório PP; 53,5°C na região intermediária do reservatório convencional; 44,5°C na região superior do reservatório PVC. O comportamento do sistema obtido neste dia foi mais satisfatório do que o obtido em 21/07/09, uma vez que foram obtidas temperaturas maiores nos sistemas alternativos e a estratificação no reservatório PP manteve-se. Devido à diferença dos resultados obtidos nos dois ensaios (21/07/09 e 12/08/09), talvez causada por variações climáticas, não é possível concluir sobre o desempenho do sistema quando este opera ativamente a 20 L/h.

As Figuras 7.1.a, 7.1.b, 7.2.a, 7.2.b, 7.3.a e 7.3.b são representativas do sistema operando ativamente com vazão de 40 L/h para PP e PVC e termossifão para o convencional.

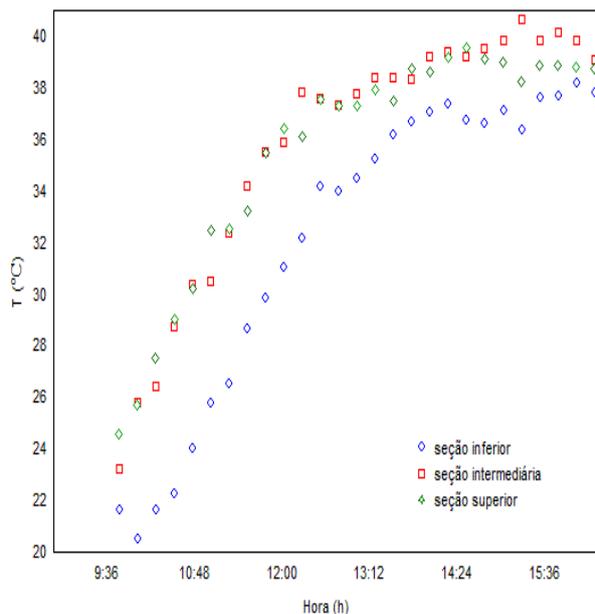


Figura 7.1.a: Temperaturas medidas em 15/08/2009 para o reservatório térmico do coletor de PP, para operação batelada e circulação forçada de 40 L/h.

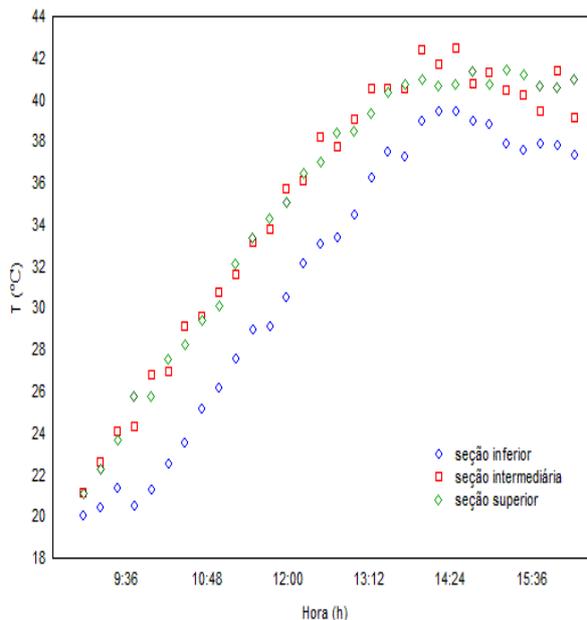


Figura 7.1.b: Temperaturas medidas em 31/08/2009 para o reservatório térmico do coletor de PP, para operação batelada e circulação forçada de 40 L/h.

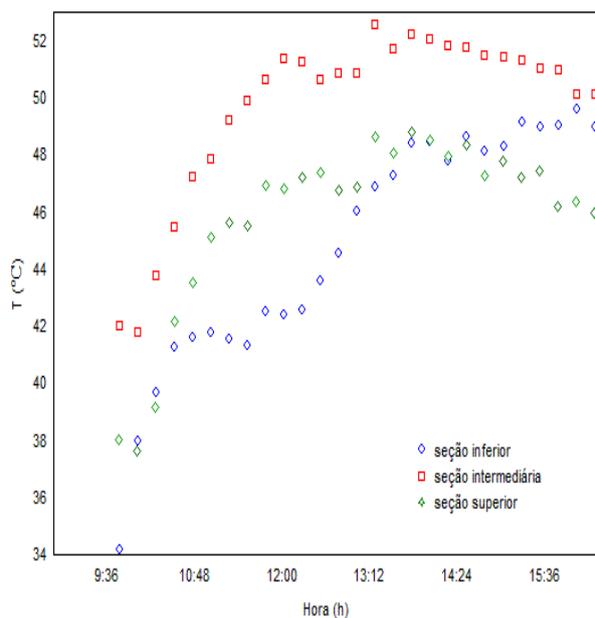


Figura 7.2.a: Temperaturas medidas em 15/08/2009 para o reservatório térmico do coletor convencional, para operação batelada e circulação natural.

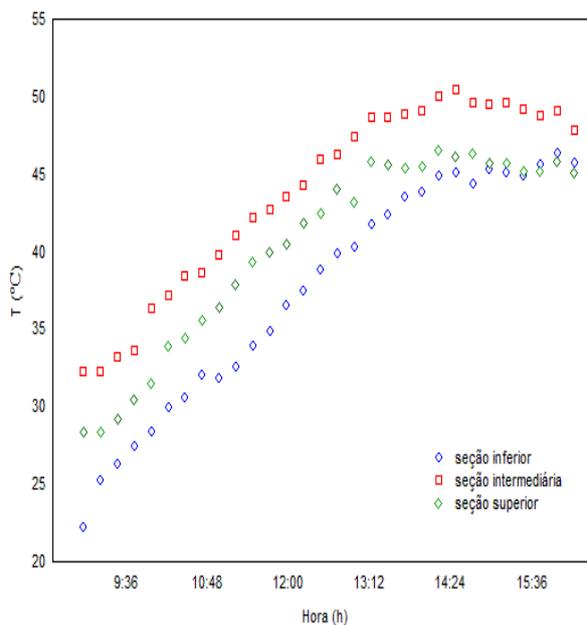


Figura 7.2.b: Temperaturas medidas em 31/08/2009 para o reservatório térmico do coletor convencional, para operação batelada e circulação natural.

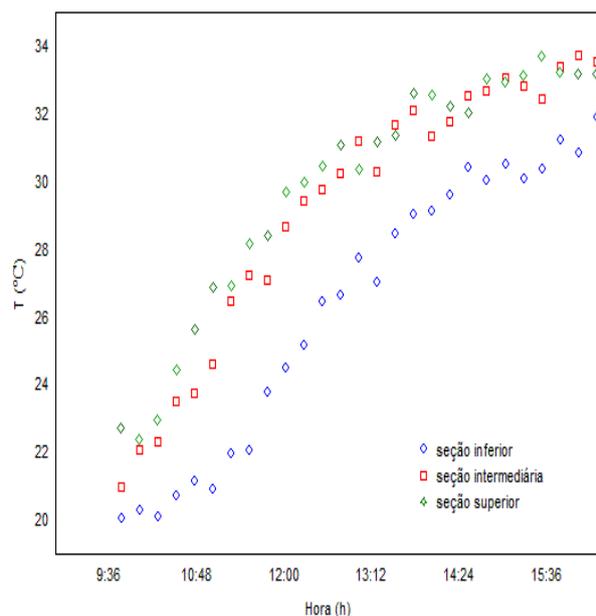


Figura 7.3.a: Temperaturas medidas em 15/08/2009 para o reservatório térmico do coletor de PVC, para operação batelada e circulação forçada de 40 L/h.

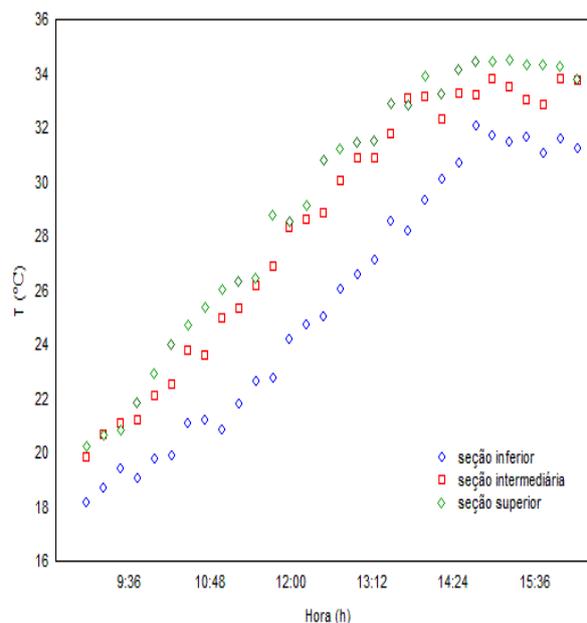


Figura 7.3.b: Temperaturas medidas em 31/08/2009 para o reservatório térmico do coletor de PVC, para operação batelada e circulação forçada de 40 L/h.

No dia 15 de agosto de 2009 o ensaio foi realizado de 9h45 às 16 h e pela análise das figuras acima pode se perceber que a maior temperatura atingida pela água nos reservatórios foi: 40,5°C na região intermediária do reservatório PP; 52,5°C na região intermediária do reservatório convencional; 33,7°C na região intermediária do reservatório PVC. Já no dia 31 de agosto de 2009 o ensaio foi realizado de 9 às 16 h e pela análise das figuras percebe-se que a maior temperatura atingida pela água nos reservatórios foi: 42,5°C na região intermediária do reservatório PP; 50,5°C na região intermediária do reservatório convencional; 34,5°C na região superior do reservatório PVC. Nota-se ainda que a região intermediária e a região superior dos reservatórios PP e PVC apresentam praticamente a mesma temperatura, enquanto que para o reservatório convencional a temperatura da região superior é ligeiramente inferior à temperatura da região intermediária. Perfis semelhantes aos encontrados para o sistema termossifão.

Para um mesmo dia de medição, os três reservatórios atingiram as suas respectivas temperaturas máximas praticamente ao mesmo tempo e na mesma hora do dia (por volta de 16 h). Pela análise dos seis ensaios percebe-se, como era de se esperar, que o sistema convencional apresentou maiores temperaturas de água aquecida. Entretanto as temperaturas alcançadas pelos sistemas de baixo custo são satisfatórias e conseguem atender às necessidades de consumo doméstico. Comparando o sistema PP com o sistema PVC nota-se que o sistema PP apresenta temperatura máxima na região intermediária enquanto que o

sistema PVC apresenta temperatura máxima na região superior, tal estudo permite instalar a torneira de consumo de maneira a fornecer água mais quente ao usuário. Além disso, para circulação natural PP e PVC atingiram praticamente a mesma temperatura final, já para sistemas bombeados a 40 L/h o sistema PP atingiu temperatura máxima maior.

Deve-se ressaltar que os coletores sem coberturas analisados possuem estruturas diferentes, sendo que a placa de PVC possui canais maiores e em menor quantidade, circulando assim um maior volume de água dentro da placa (10L), enquanto que a placa de PP possui uma maior quantidade de canais e com diâmetros menores, circulando assim um menor volume de água dentro da placa (4L).

Observando o perfil de temperaturas no reservatório convencional, percebe-se que as temperaturas são maiores na região intermediária e não na região superior. Isto se deve ao fato de que a alimentação de água quente (retorno) é realizada na seção intermediária do *boiler*. Dentro do reservatório, a massa de água vai de encontro à camada de água que apresenta uma densidade aproximadamente igual, sendo que a massa de água mais quente, por ter uma densidade menor, se direciona para a seção superior do reservatório, onde é feita a retirada do fluido quente.

Quando as temperaturas das regiões dos reservatórios se aproximam significa que as trocas de calor entre as camadas da estratificação estão sendo efetivas e mostram a tendência à homogeneidade de temperatura nos *boilers*.

3.2. Operação Contínua

Nesta parte do trabalho tem-se um estudo referente à dinâmica de aquecimento do fluido no interior do *boiler* para regime de escoamento contínuo, simulando um banho. Para tanto, numa dada condição operacional, foi simulada a dinâmica do fluido no *boiler* com o intuito de avaliar a máxima temperatura alcançada pelo fluido e disponibilizada ao usuário, bem como a distribuição de temperatura no interior do reservatório (estratificação). 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 por balanços energéticos. Para tanto, com o intuito de ampliar as informações que seriam obtidas por balanços energéticos, técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) foram utilizadas.

Uma representação esquemática do sistema estudado, similar àquele instalado junto à unidade experimental de aquecimento solar que se encontra na FEQUI/UFU, é apresentada na Figura 8.

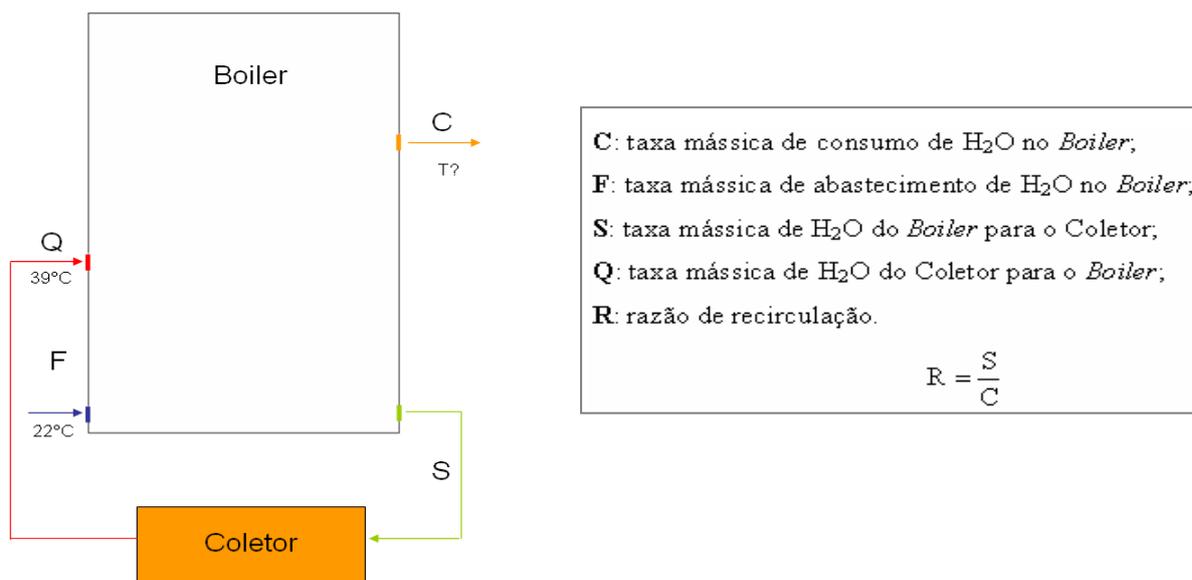


Figura 8 – Representação esquemática do sistema ASBC (*boiler* de 90 L) em operação contínua.

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). Definiu-se “R” como a razão entre a taxa mássica que circula pelo coletor “S” pela taxa mássica do consumo “C” (disponibilizada ao usuário). Os perfis de temperatura simulados no interior do *boiler* podem ser visualizados pela Figura 9.

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* (onde se localiza a captação para o consumo). Este comportamento é ainda interessante porque a água fria ficará depositada no fundo do *boiler* e será encaminhada diretamente para a placa solar coletora (na placa haverá maiores gradientes de temperatura, favorecendo a absorção de calor).

Por outro lado, razões de recirculação menores do que 0,2 podem comprometer o desempenho do *boiler* porque a estratificação térmica fica comprometida. 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.

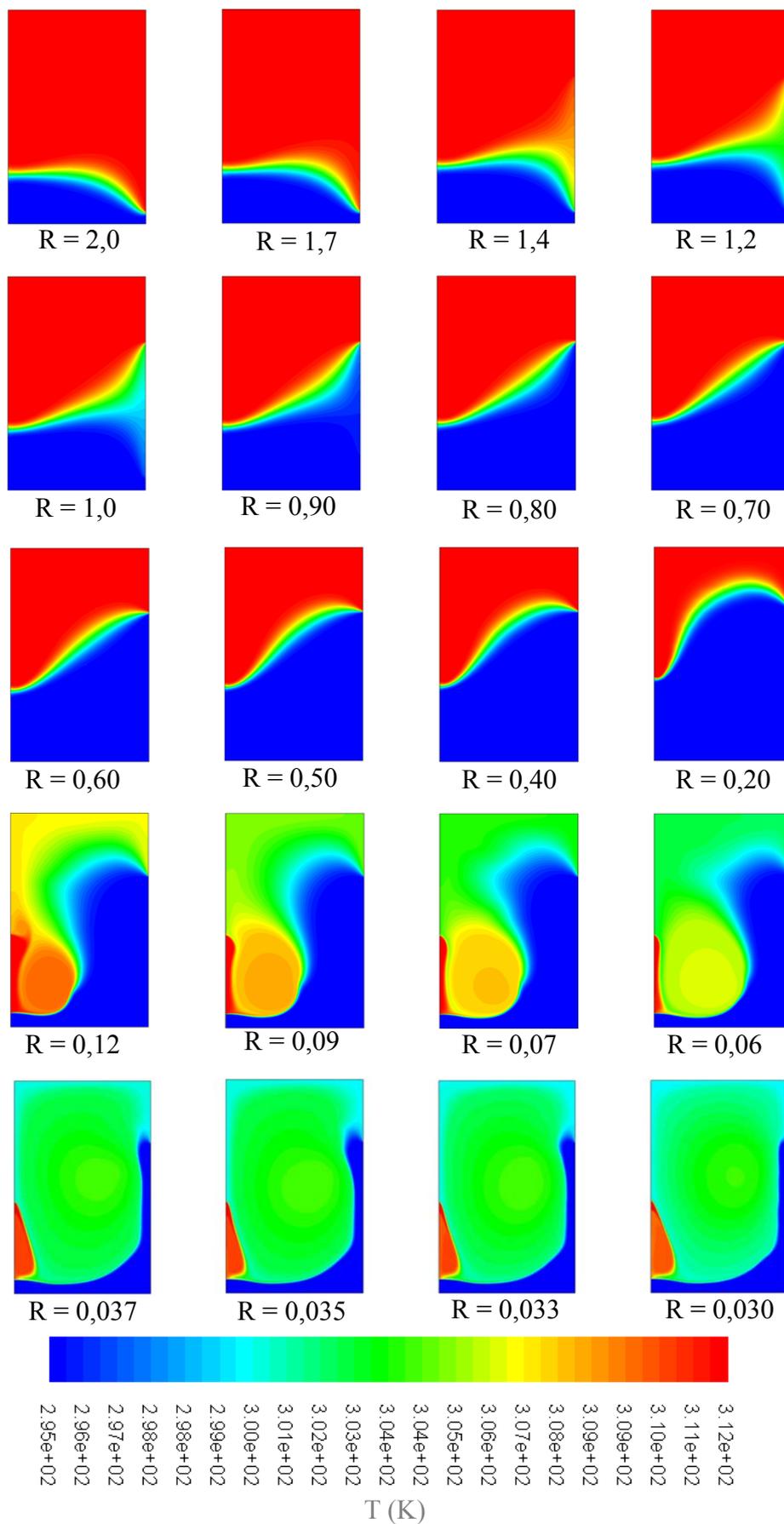


Figura 9 – Perfis de Temperatura no interior do *boiler* em função de “R”.

Para cada uma das simulações representadas na Figura 9, há uma temperatura média do fluido fornecida na corrente de consumo do *boiler*. Esta temperatura média é obtida mediante a integração do perfil térmico ao longo da fronteira de saída, conforme é ilustrado genericamente na Figura 10.

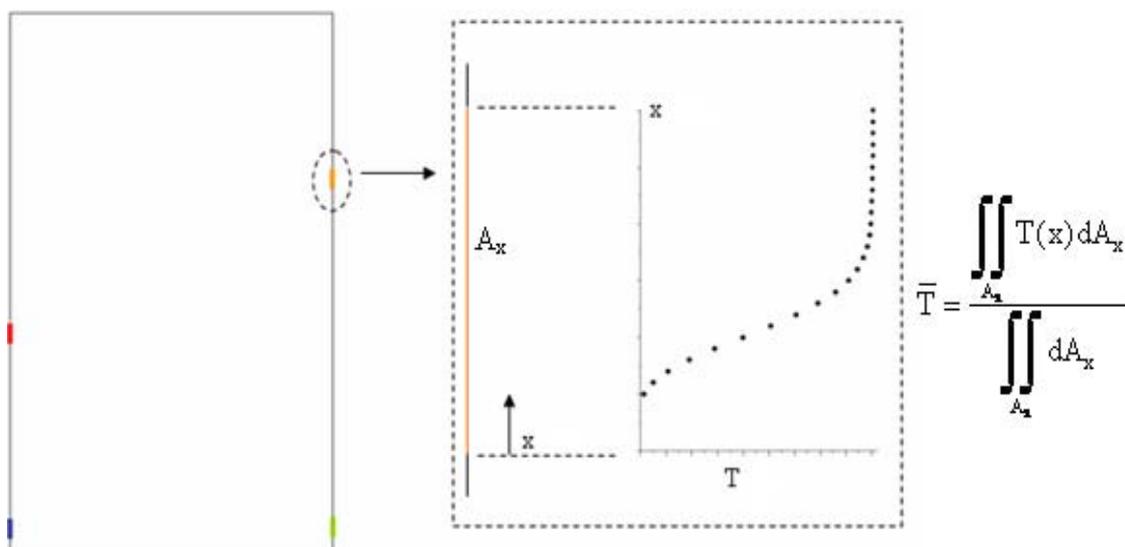


Figura 10 – Perfil de temperatura e temperatura média do fluido ao longo do duto da corrente de consumo do *boiler*.

Os valores médios de temperatura na corrente de consumo, obtidos por meio das técnicas de CFD e da metodologia apresentada na Figura 10, estão contidos na Figura 11.

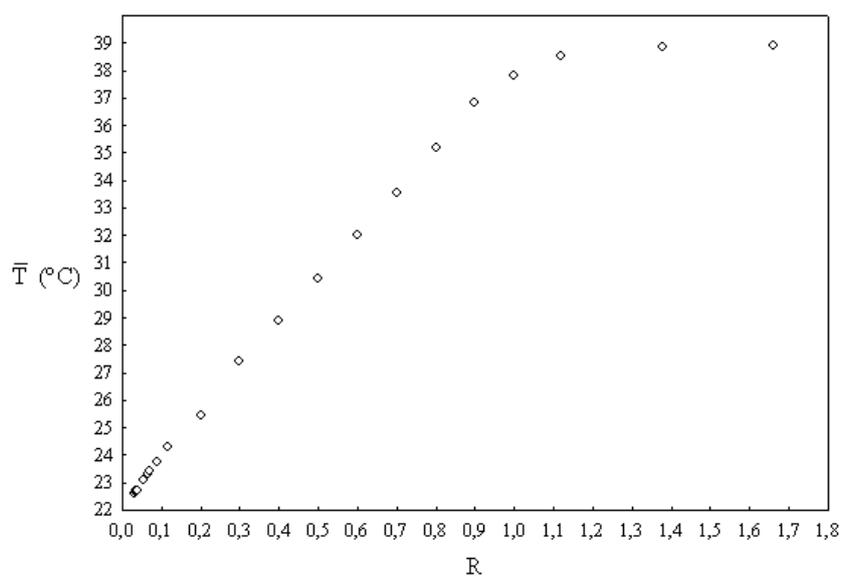


Figura 11 – Temperatura média do fluido disponível ao usuário (corrente de consumo) obtida por meio das técnicas de CFD em face de distintas “R”.

Analisando as Figuras 9 e 11 apresentadas anteriormente, verifica-se que as técnicas de 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, otimizando-os no sentido de se obter as melhores condições operacionais e geométricas.

3.3. Análise Econômica

O efeito sobre a economia familiar com o uso de um ASBC pode ser notado considerando os gastos com o chuveiro elétrico em uma residência de classe baixa. Transformando o consumo elétrico evitado em uma residência, o ASBC poderá produzir uma economia média de cerca de R\$ 388,00 para cada família por ano (1204 Kwh por família por ano x 0,75 de eficiência x R\$ 0,43 por Kwh cobrado pela distribuidora de energia). Isto resulta num retorno financeiro de 9 meses após início de uso do ASBC, admitindo o seu custo em R\$300,00/unidade (Projeto ASBC, 2009). O valor médio de um aquecedor solar convencional de 100 L disponível no mercado é em torno de R\$1.200,00, cerca de 4 vezes o valor de um aquecedor de baixo custo de mesmo volume.

4. CONCLUSÃO

Em comparação com o reservatório convencional, os reservatórios de baixo custo analisados apresentaram desempenho térmico satisfatório em relação aos valores atingidos de temperatura.

Quando em circulação natural, os dois reservatórios de baixo custo analisados atingiram valores de temperatura similares, e quando em circulação forçada o desempenho térmico dos ASBC alternou, o reservatório da placa de PP apresentou melhores resultados em relação ao reservatório da placa de PVC para vazão de 40 L/h.

As técnicas em fluidodinâmica computacional mostraram satisfatoriamente a temperatura média da corrente de consumo que sai do boiler e como o fluido se estratifica no interior do reservatório ASBC.

Considerando que a temperatura desejada a ser atingida pela água está um pouco acima da temperatura ambiente, os resultados obtidos demonstram que embora os aquecedores solares de baixo custo tenham atingido temperaturas mais baixas em relação ao aquecedor convencional, os mesmos apresentaram um ótimo desempenho térmico. Assim, os

benefícios econômicos, sociais e ambientais gerados quanto ao uso desta tecnologia de aquecimento de água devem ser amplamente divulgados e seu uso popularizado, principalmente entre a população de baixa renda.

Os ASBC são capazes de fornecer a maior parte da energia térmica consumida pelo chuveiro elétrico, promovendo sensível economia energética, doméstica e nacional. Além deste fato, a energia solar é ecologicamente limpa, ao contrário da energia proveniente das novas usinas termoeletricas, em fase de implantação, que causam poluição local e aquecimento planetário.

No Brasil, diante da necessidade da busca de práticas tecnológicas e sociais na área de energia solar e renovável, estes equipamentos surgem para auxiliar na redução da demanda elétrica nacional, visto que cerca de 7% a 10% de toda a energia gerada no país é consumida em, aproximadamente, 50 milhões de chuveiros elétricos ligados todos os dias (Canal Ciência, 2010).

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia pelas condições oferecidas para a realização deste trabalho e ao programa PIBIC/FAPEMIG/UFU pela concessão da bolsa servindo de apoio financeiro para concepção e execução deste projeto de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEZERRA, A. M. Aplicações térmicas da energia solar. UFPB, Editora Universitária, 3ª edição, João Pessoa – PB, 1998.
- CRISTOFARI, C.; NOTTON, G.; POGGI, P.; LUCHE, A. Modelling and performance of a copolymer solar water heating collector. *Solar Energy*, v. 72, n. 2, p. 99-112, 2002.
- FLUENT INC. *Fluent 6.3.26 User's Guide*, Lebanon, NH 03766, 2007. Disponível em: <<http://www.fluent.com>>. Acesso em: 02 set. 2009.
- CANAL CIÊNCIA. In: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT). Disponível em: <<http://www.canalciencia.ibict.br/pesquisa/0053-Aquecedores-solares-de-baixo-custo.html>>. Acesso em: 04 fev. 2010.
- ESTAÇÕES E DADOS. In: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 04 fev. 2010.

- JURADO, D. A. J. Modelagem dinâmica de um sistema solar termossifão usando coletores atmosféricos de plástico. Dissertação (Mestrado), UFU, Uberlândia - MG, 102 p., 2004.
- KUDISH, A.; EVSEEV, E.; WALTER, G.; LEUKEFELD, T. Simulation study of a solar collector with a selective coated polymeric double walled absorber plate. *Energy Conversion and Management*, v. 43, p. 651-671, 2002.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU S. L.; RÜTHER, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar, INPE, São José dos Campos – SP, 60 p., 2006 (a). Disponível em: <http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2009.
- PEREIRA, R. C.; SHIOTA, R. T.; MELLO, S. F.; ASSIS JR. V.; BARTOLI J. R. Eficiência térmica de coletores solares de baixo custo. In: 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu - PR, 2006 (b).
- RÍSPOLI, I.A.G. O aquecedor solar brasileiro - teoria e prática em prol de uma transferência de tecnologia sustentável. Tese (Doutorado), Unicamp, Campinas - SP, 200 p., 2008.
- RODRIGUES, D.; MATAJS, R. Um banho de sol para o Brasil: o que os aquecedores solares podem fazer pelo meio ambiente e a sociedade. Vitae Civilis, ISBN 85-99722-01-8, São Lourenço da Serra - SP, 2005. Disponível em: <http://br.boell.org/downloads/Banho_de_sol_CEPEL1.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2009.
- SIQUEIRA, D.A. Estudo de desempenho do aquecedor solar de baixo custo. Dissertação (Mestrado), UFU, Uberlândia - MG, 125 p., 2009.
- PROJETO ASBC. In: SOCIEDADE DO SOL. Disponível em: <<http://www.sociedadedosol.org.br>>. Acesso em: 10 dez. 2009.
- VIEIRA, L. G. M. Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes. Tese (Doutorado), UFU, Uberlândia - MG, 297 p., 2006.