

ESTUDO SOBRE SISTEMAS DE BAIXO CUSTO PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA POR ENERGIA SOLAR UTILIZANDO COLETORES SOLARES E RESERVATÓRIOS TÉRMICOS A BASE DE MATERIAIS POLIMÉRICOS

Brino Ruy Negri - bjnegri@yahoo.com.br

Antônio Carlos Luz Lisboa - lisboa@feq.unicamp.br

Julio Roberto Bartoli - bartoli@unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Faculdade de Engenharia Química

Marco César Prado Soares - marcosoares.feq@gmail.com,

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Faculdade de Engenharia Mecânica

Resumo. O objetivo deste estudo é investigar reservatórios térmicos de baixo custo para armazenamento de água aquecida por coletores solares de baixo custo (CSBC), construídos com polímeros de commodities, e minimizar a perda de calor da água no período noturno. Os reservatórios são caixas de água cilíndricas, comuns, fabricadas em material termoplástico (polietileno), como alternativa a materiais metálicos de custo superior, como nos reservatórios térmicos construídos em aço inoxidável. As isolações térmicas das caixas de água foram feitas com mantas térmicas de espuma elastomérica metalizada, bem como sistemas de caixa de água dentro de outra caixa isolada com a manta. Por sua vez, os CSBCs são construídos com placas de forro de PVC, prescindem do efeito-estufa (sem cobertura transparente). Um breve histórico sobre os CSBC é apresentado, passados 20 anos do seu desenvolvimento com apoio do programa PIPE-Fapesp. Se destacam por adequada eficiência térmica e são uma opção técnica-econômica aos tradicionais coletores solares para aquecimento de água, que usam materiais de maior valor: tubos de cobre ou alumínio, vidro. Os resultados experimentais deste estudo demonstraram o bom desempenho dos reservatórios térmicos de baixo custo, medindo-se uma temperatura da água 16°C acima daquela medida em reservatório sem isolamento térmico, às 6 h do dia seguinte. Deste modo, permitem dispor de água pré-aquecida para uso do chuveiro elétrico em carga mínima, no inverno, ou mesmo sem carga no verão, em especial para banhos matutinos. Além de contribuir com uma economia significativa nas famílias de baixa renda, os sistemas compostos de coletores solares CSBC e reservatórios termicamente isolados de baixo-custo, têm impacto na redução no consumo de energia elétrica no país, bem como nas questões ambientais e de sustentabilidade.

Palavras-chave: Energia solar; Coletor solar de baixo custo, Reservatório de água quente, Isolação térmica, Economia de energia.

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais necessidades da sociedade e um dos grandes desafios da atualidade é a disponibilidade de energia elétrica causada pelo consumo cada vez maior, tomando o abastecimento, um dos grandes desafios da humanidade (Alva et al., 2017). Para satisfazer algumas de suas necessidades básicas, o homem de qualquer nível social, e em qualquer lugar do mundo, faz uso necessariamente dos recursos energéticos seja em forma de calor ou de trabalho. Muitas alternativas energéticas existem na natureza e são largamente utilizadas como a energia obtida com o uso do carvão, do petróleo, as hidroelétricas e as nucleares, outras que por limitações técnicas e/ou econômicas, ainda não foram desenvolvidas, como a energia solar, a eólica e biomassa, por exemplo, e são utilizadas apenas parcialmente. A disponibilidade desses recursos energéticos e a forma de utilização dos mesmos são fatores fundamentais no desenvolvimento tecnológico das nações (Anderson, 1977).

Novas fontes de energia de baixo custo são necessárias, a energia solar surge como uma alternativa interessante para a geração de eletricidade e calor, fonte renovável e sustentável. Atualmente, a energia solar é usada em diferentes aspectos da vida diária, incluindo aplicações térmicas domésticas como no aquecimento de moradia e abastecimento de água quente (Anderson, 1977; Alva et al., 2017; Duffie e Beckman, 1991). Além disso, a energia térmica solar aplicada à geração de energia está aumentando drasticamente em todo o mundo, com usinas térmicas concluídas e em construção na Europa, EUA, Austrália e África (Liu et al., 2012).

Muito tem sido feito por instituições de pesquisas, políticas governamentais e fabricantes para adequarem a produção de coletores solares térmicos à demanda de água quente. Contudo a conversão, armazenamento e aplicação de energia solar ainda representam desafios para o desenvolvimento de um sistema de energia sustentável (Rodríguez-Hidalgo et al., 2012). As principais razões para isso são duas: irradiação solar, consumo e acumulação térmica, inerentemente transitórios e intermitentes no espaço e no tempo; e a luz visível (~44 % da radiação, fração efetivamente

convertida) quase não pode ser aplicada direta ou efetivamente devido à baixa eficiência térmica dos coletores solares (Wang et al., 2012). Um problema na utilização da energia solar térmica, para aquecimento de água, é a estabilidade da geração, pois sua disponibilidade durante o dia pode oscilar em função de época do ano, presença de nebulosidade ou chuva, e, claro, no período noturno. Ainda que o sistema energético brasileiro é baseado na geração através de hidrelétricas, não vulnerável a este tipo de variação, ele está sujeito à oscilação em função dos períodos diários de uso, são os chamados “horários de pico” de consumo de energia elétrica, no início da manhã e no final da tarde. Esta sobrecarga pontual de consumo obriga as concessionárias de energia a terem toda a sua malha planejada e preparada para atender a demanda nestes horários.

Um dos principais “vilões” para gerar esta sobrecarga nos horários de pico é o chuveiro elétrico muito comum e difundido na maioria dos lares brasileiros. Segundo o Anuário Estatístico de Energia (EPE, 2018) a classe residencial detém 28,8% do mercado de energia elétrica com consumo de 134.368 GWh no ano de 2017. Nesta classe, o chuveiro elétrico, é ainda o principal meio de aquecimento de água para o banho e conforme responde pela maior parcela de consumo de energia elétrica residencial que gira em torno de 20% do total gasto (Castro, 2014).

Uma das formas alternativas para reduzir a demanda causada pelo chuveiro elétrico é utilizar a energia solar para o aquecimento de água para o banho. Todavia, os coletores solares para aquecimento de água comercializados ainda não são tão acessíveis à para a maioria da população brasileira, basicamente por serem construídos com tubos de cobre ou de alumínio e cobertura de vidro, materiais de custo relevante (Rispoli, 2001). Por sua vez, há também um custo importante dos reservatórios térmicos para manter a água aquecida, em geral construídos em aço inoxidável e revestidos com material isolante térmico. Deste modo, o impacto do aquecimento solar de água no pico de consumo gerado ainda não é muito significativo; considerando-se, também, que a maioria das edificações urbanas não foram projetadas para instalação de coletores solares.

As otimizações de sistemas para aquecimento de água com energia solar, em geral são estudadas visando o armazenamento da água em reservatórios térmicos, essencial para garantir a disponibilidade de água quente à noite ou no dia seguinte. O comportamento térmico da água dentro de reservatórios térmicos, construídos em aço inoxidável e isolados com lã de vidro, foi estudado utilizando métodos experimentais e de simulação numérica (Oliveski et al, 2003; Savicki et al.; 2006). Analisaram-se os campos de temperatura e velocidade do fluido dentro de reservatórios cilíndricos, na posição vertical e horizontal, submetido a convecções internas naturais ou mistas; isto é, natural e forçada, decorrente dos fluxos de saída e entrada no reservatório.

Por outro lado, como ocorre em diversas áreas da engenharia, materiais poliméricos têm substituído outros materiais, em especial os metálicos, quando seu desempenho mecânico é similar, avaliado pela razão entre módulo de elasticidade e densidade do material (módulo específico), permitindo reduzir peso e custos em diversas aplicações (Ashby, 1989; 2005). Deste modo, o Coletor Solar de Baixo Custo - CSBC (Bartoli, 1999), apresentado na subseção seguinte, surgiu como uma alternativa aos coletores solares convencionais e de custo acessível às famílias de baixa renda. O CSBC é todo construído em PVC, material termoplástico de commodities na construção civil e de conhecida confiabilidade, revelando-se adequado no aquecimento da água para o banho, ao final do dia, e dispensando ou reduzindo a demanda do chuveiro elétrico.

No presente trabalho, por sua vez, é apresentado um estudo para melhorias nos reservatórios de armazenamento da água aquecida pelos coletores solares CSBC. Isto é, o objetivo é minimizar a perda de calor da água no reservatório num período de 12 horas (banho no dia seguinte), considerando materiais poliméricos isolantes térmicos adequados ao conceito baixo-custo. Utilizaram-se caixas d'água convencionais (100 L) de material termoplástico (polietileno) revestidas com mantas térmicas de borracha nitrílica expandida, de uso comum em sistemas para conforto térmico de ambientes. Assim como, o uso de uma caixa d'água revestida com manta térmica e instalada no interior de uma outra caixa d'água, de maior volume (150 L). Estes volumes de caixa d'água foram definidos por razões de escala de laboratório.

Deseja-se, portanto, verificar o custo-benefício desta tecnologia simples na isolação térmica dos reservatórios de água aquecida pelos coletores solares CSBC, oferecendo água quente no dia seguinte. Nas manhãs mais frias, poder-se-ia até utilizar o chuveiro elétrico na sua menor carga, reduzindo o consumo de energia elétrica. A importância desse sistema acessível a famílias de menor nível socioeconômico permite, também, a elas reduzirem suas despesas com energia elétrica.

1.1 Breve Histórico dos Coletores Solares de Baixo Custo

Com apoio do programa PIPE (Pesquisa Inovativa em Pequenas Empresas) - Fapesp, Bartoli e colaboradores (1999) realizaram, no CIETEC/Ipen (Centro Incubador de Empresas, em S. Paulo), um estudo de viabilidade técnico-econômica para desenvolvimento de coletores solares fabricados com materiais termoplásticos. Verificou-se, então, que os protótipos de aquecedores solares de baixo custo seriam opções factíveis como coletores solares passivos e atender a grande maioria de famílias de baixa renda, uma vez que poderiam ser facilmente construídos pelo método “faça-você-mesmo”.

Seguiram-se estudos de eficiência térmica e confiabilidade destes protótipos, agora denominados de CSBC, na Faculdade de Engenharia Química (FEQ) da Unicamp, Campinas, (Bartoli et al., 2004; Pereira et al. 2005; Pereira et al, 2006; Bartoli et al., 2011). As atividades de pesquisa contaram com a participação de alunos de graduação, pós-graduação e empresa júnior Propeq/FEQ/Unicamp, em projetos sociais de extensão universitária, oferecendo cursos

gratuitos, elaborando manuais, ensinando a construção e instalação dos CSBC em comunidades e instituições assistenciais na região de Campinas. Os CSBCs tornaram-se, assim, uma fonte de renda adicional às famílias de operários, pedreiros, encanadores, dentre outros, que além de construir os seus coletores solares, passaram a oferecer também serviços de montagem e instalação destes sistemas em residências e para aquecimento de água de piscinas.

Uma ONG, denominada Sociedade do Sol, foi constituída em S. Paulo logo após o encerramento do projeto PIPE/Fapesp (2000), sem envolvimento deste grupo (FEQ/Unicamp). Mais tarde, em 2005, uma empresa do ramo de chuveiros elétricos, em colaboração com a ONG, fabricava kits para montagem destes tipos de aquecedores solares de baixo custo, comercializados em todo o território nacional até 2013, quando a empresa foi adquirida por um grande grupo empresarial.

As características técnicas dos CSBCs apresentam o mesmo princípio de funcionamento de um coletor solar convencional, passivo, para aquecimento de água: o efeito termossifão. Porém não têm a cobertura de vidro (efeito estufa) de modo a prevenir o aquecimento demasiado da água, preservando a integridade dos componentes de PVC rígido comum (temperatura de uso contínuo até 60°C). A placa coletora é construída de forma simples com forros modulares de material termoplástico (PVC), cujo custo é reduzido por ser produzido em alta escala industrial para a construção civil. A eficiência térmica dos CSBCs foi avaliada nos laboratórios de simulação solar da instituição certificadora Green PUC-Minas, tendo sido determinada uma eficiência máxima de 67%, em condições climáticas sem vento, muito próxima aos coletores comerciais de 70% (Pereira et al, 2006). Esta boa eficiência é devida a uma adequada transferência de calor da superfície absorvedora do coletor com a água que circula pelas canaletas internas da placa coletora, uma vez que toda a área da placa está em contato com a água; isso não ocorre em coletores convencionais com tubos de cobre ou alumínio. Dimensiona-se, em geral, duas placas de forro de PVC (0,75 m² cada) para aquecer 300 L de água até 50°C, na região de Campinas.

A durabilidade dos coletores CSBC foi estudada em outros trabalhos deste grupo (Prado, 2010; Bartoli et al., 2011), verificando-se o bom desempenho dos coletores após 5 anos de uso contínuo, instalados no recinto de testes (FEQ/Unicamp) e em entidades assistenciais, para aquecimento de água do banho, na região de Campinas. Nesse período não houve comprometimento mecânico das placas dos coletores, requerendo apenas retoque da pintura preta da superfície absorvedora. Nesse estudo foi, também, analisada a correlação entre estrutura química e propriedades mecânicas do PVC rígido, com amostras retiradas das placas após 3 anos em condições de envelhecimento natural, foto-termo-oxidativo. Observou-se uma redução de 7% na Tensão de Ruptura (sob tensão), não significativa, medindo-se $41,4 \pm 7$ MPa e $38,7 \pm 8$ MPa em amostras originais e após 36 meses, respectivamente; valores estes considerados de referência para o PVC rígido (Rodolfo Jr. et al, 2002).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Protótipos do sistema de armazenamento de água aquecida foram fabricados em quatro distintas configurações de isolamento térmico (Tab. 1), utilizando coletores solares planos de baixo custo (CSBC) e reservatórios de água de uso comum na construção civil.

Tabela 1: Configurações dos protótipos dos reservatórios de armazenamento de água

Protótipos	Construção do Reservatório para Armazenamento de Água	Revestimento Térmico com Manta (espessura)
1	Caixa d'água (100 L) revestida externamente	10 mm
2	Caixa d'água (100 L) revestida externamente	15 mm
3	Caixa d'água (100 L) sem revestimento	-
4	Caixa d'água revestida (100 L) dentro de Caixa sem revestimento (150 L)	10 mm

As placas coletoras do CSBC (1,25 m x 0,62 m, área útil 0,75 m²) foram construídas usando forros modulares de PVC rígido, com canaletas internas (Confibra), e tubos e conexões de PVC rígido comum (Fig.1), conforme descrito em prévias publicações (Bartoli et al., 2004; Pereira et al. 2005; CSBC, 2008). As placas foram revestidas com esmalte sintético preto fosco (Coralit), a base de resinas alquídicas e negro de fumo, produzindo-se uma superfície absorvedora seletiva. Os coletores não possuem cobertura transparente (sem efeito estufa). Os sistemas em estudo foram instalados no recinto de testes da Faculdade de Eng. Química da Unicamp, com as placas coletoras inclinadas a 33° (latitude de Campinas + 10°) e observando-se os requisitos da NBR.15.747/2009 (ABNT).

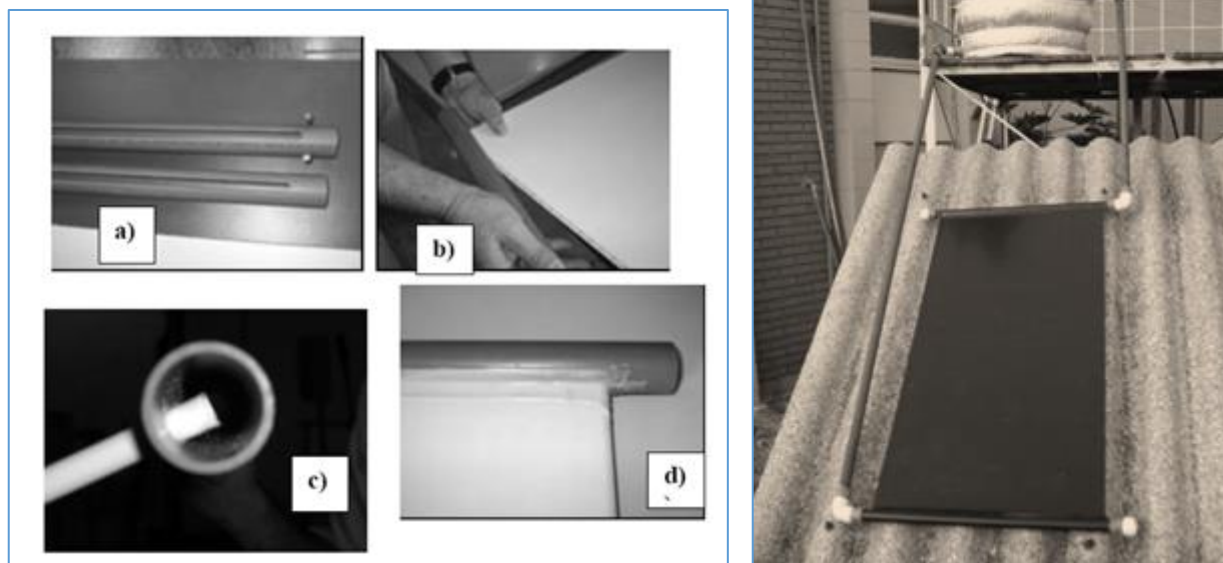


Figura 1: Aspectos da montagem do coletor solar CSBC: a) tubos de PVC cortados; b) encaixe dos tubos nas placas de forro de PVC; c) e d) detalhe dos tubos colados na placa. Instalação, no recinto de testes, de um coletor CSBC (revestido com esmalte preto) acoplado ao reservatório para armazenamento de água isolado com manta térmica.

Caixas d'água de uso comum na construção civil, em polietileno de média densidade (Fortlev), foram usadas como reservatórios cilíndricos para armazenamento da água aquecida, com capacidades para 100 e 150 litros (Fig. 2). Mantas isolantes térmicas de espuma elastomérica flexível (Armaduct, da Armacell) foram empregadas no revestimento externo dos reservatórios, lateral e tampa (Fig. 1 e 3), utilizadas em duas espessuras de 10 e 15 mm; sendo fixas com fitas plásticas e/ou adesivo para manta Armaduct. São mantas a base de borracha nitrílica expandida e se caracterizam por sua baixa condutividade térmica (coeficiente de transferência de calor convectivo de $18 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), resistência à difusão de vapor de água e estanqueidade por ter células fechadas. A superfície externa das mantas é revestida com uma camada de poliéster metalizado, resistente a intempéries, raios UV e impactos. São materiais específicos para isolamento térmico de sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado para conforto térmico de ambientes, custo benefício, fácil aplicação e não desprender fibras ou partículas. Esta escolha não é exclusiva; outros produtos com características similares de isolamento térmico, flexibilidade e baixo custo podem ser aplicados. Uma caixa d'água de 100 litros não isolada termicamente foi empregada como referência (protótipo 3). Na montagem do protótipo 4 (Fig. 3) foi colocado um disco de madeira na base da caixa d'água interna para ajustar as cotas entre as duas caixas e conectar as conexões de entrada e saída de água.



Figura 2: Reservatórios para armazenamento de água: à esquerda, protótipo 3, caixa sem isolamento (100 L); e protótipo 4, caixa (100 L) com manta térmica de espuma elastomérica (10 mm) dentro de outra caixa (150 L).

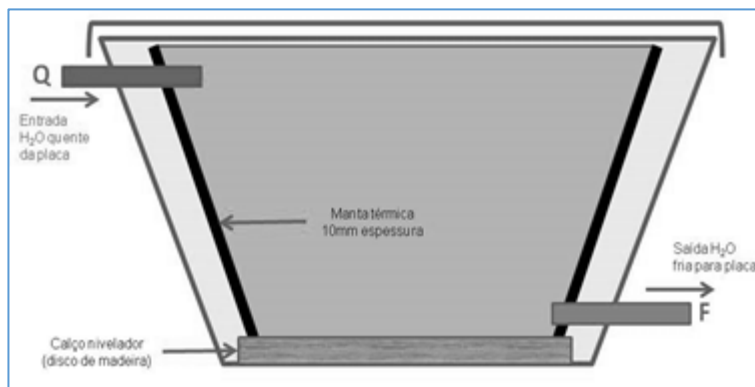


Figura 3: Esquema do protótipo 4, reservatório do tipo: caixa d'água (100 L) dentro de caixa (150 L), com revestimento térmico de espuma elastomérica (10 mm) na caixa interna.

Um estudo preliminar foi realizado para simular o efeito da espessura das mantas de isolamento térmica disponíveis (10 e 15 mm) para um sistema de armazenamento de água, considerando as configurações dos protótipos propostos. A simulação térmica foi realizada com auxílio do programa ArmWin®, disponibilizado pela Armacell (ArmWin, *Insulation Thickness Calculator*, 2018). O programa permite calcular a temperatura final da água após um período de tempo (variáveis de saída), assumindo uma temperatura inicial da água quente (variável de entrada), armazenada dentro de um reservatório cilíndrico e revestido com material isolante de determinada condutividade térmica (variável de entrada).

As etapas experimentais, por sua vez, foram realizadas com protótipos ensaiados aos pares, simultaneamente, no recinto de testes ao longo de um mês. As temperaturas da água em cada reservatório foram medidas com três termopares tipo T, nas cotas definidas como: inferior, central e superior (Fig. 4). Mediu-se, simultaneamente, também a temperatura do ambiente no recinto de testes. As medidas eram coletadas, a cada hora, pelo sistema de aquisição de dados para temperatura NAP-7000D – ICP COM (SDC Engenharia) e registradas em um microcomputador (PC – Hewlett-Packard). Os termopares eram calibrados periodicamente.

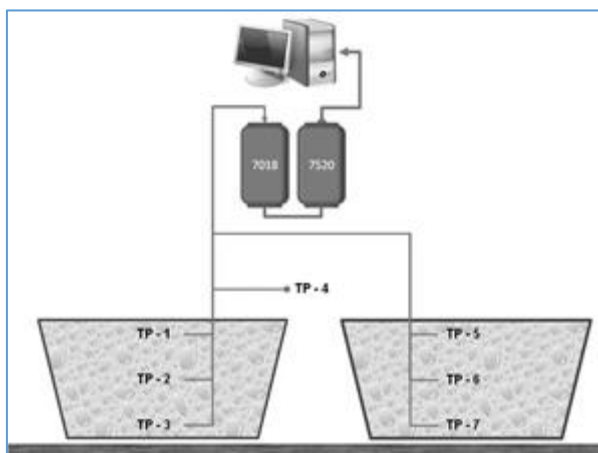


Figura 4: Esquema das medidas de temperatura a diversas cotas dos reservatórios e do ambiente (TP-4).

3. RESULTADOS

Os resultados da simulação numérica preliminar (programa ArmWin), na transferência de calor dentro dos reservatórios com água aquecida, permitiram prever a temperatura final da água após 12 horas e definir as espessuras das mantas térmicas de espuma elastomérica que foram utilizadas nos experimentos com os protótipos. Uma correlação muito boa foi verificada entre os dados experimentais e os da simulação (Fig. 5), para um reservatório termoplástico de 100 L isolado com uma manta térmica de espuma elastomérica com 10 mm de espessura. No início do período de medidas de temperatura da água no reservatório isolado termicamente, às 18 h, a temperatura era de 41°C (temperatura ambiente do ar ~26°C) e de 32 °C às 6 h da manhã do dia seguinte (Tamb. ~17°C). Isto é, observa-se uma diferença de temperatura entre a água e o ambiente de 15°C, seja no experimento real como também na simulação numérica. Correlações semelhantes foram obtidas com a manta de espessura de 15 mm, para o mesmo tipo de reservatório.

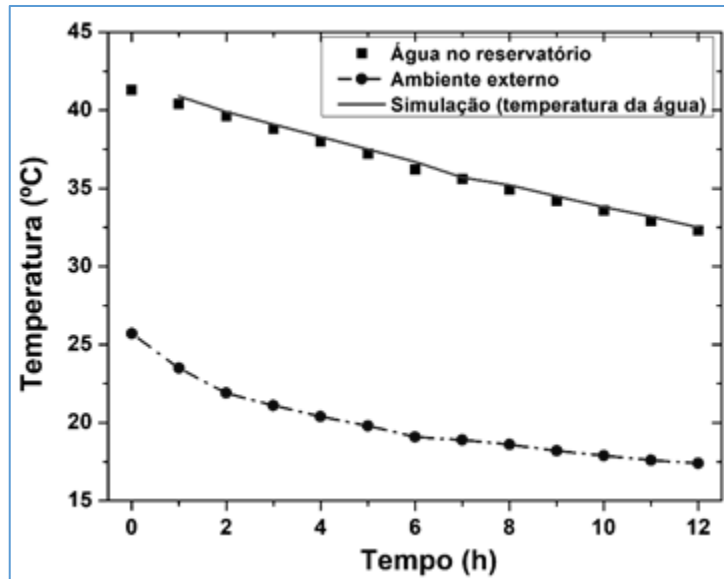


Figura 5: Gráfico da temperatura no período de 12 horas (entre 18 h e 6 h) para os dados experimentais e de simulação numérica, obtidos com um reservatório de 100 L isolado com manta térmica de 10 mm de espessura.

Os resultados experimentais com os protótipos dos reservatórios são apresentados (Tab. 2) em função das diferenças de temperaturas da água quente em relação à temperatura ambiente ($\Delta T = T_{\text{água no protótipo}} - T_{\text{ambiente}}$) para o período crítico noturno de 12 horas, entre as 18 h e 6 h (valores médios de várias semanas de medidas). As temperaturas foram medidas no nível superior da água armazenada no reservatório térmico.

Tabela 2: Resultados das diferenças de temperatura entre a água armazenada nos reservatórios e a temperatura ambiente (valores médios) para os 4 protótipos no período noturno.

Protótipo	1	2	3	4
Horário	$\Delta T (T_{10\text{mm}} - T_{\text{amb}})$ (°C)	$\Delta T (T_{15\text{mm}} - T_{\text{amb}})$ (°C)	$\Delta T (T_{\text{ref.}} - T_{\text{amb}})$ (°C)	$\Delta T (T_{\text{caixa/caixa}} - T_{\text{amb}})$ (°C)
18h00	18,5	19,9	19	25,8
19h00	20,6	22,2	18,8	26,9
20h00	21,1	22,7	18,1	27,4
21h00	21,6	23,2	17	27,5
22h00	21,6	23,3	16,1	27,6
23h00	21,6	23,3	15,1	27,5
24h00	19,9	21,3	14,1	27
01h00	21,1	22,6	13,5	27,1
02h00	20,9	22,5	12,8	27
03h00	20,2	21,7	12,1	26,9
04h00	19,5	21	11,5	26,8
05h00	19,8	21,3	10,9	26,6
06h00	20,7	22,5	10,4	26,4

Observa-se no horário das 6 h (crítico pela perda de calor na madrugada), uma temperatura média da água acima da temperatura ambiente de: 10,4°C; 20,7°C; 22,5°C e 26,4°C, para todos os protótipos. Os sistemas de isolamento térmico dos reservatórios em estudo apresentaram melhor ΔT em relação ao sistema não isolado termicamente (protótipo 3), sendo de 10°C; 12°C e 16°C, protótipos 1, 2 e 4, respectivamente. A condutividade térmica do polietileno de média densidade (0,33 - 0,42 W/m.K), material das caixas d'água, é uma ordem de grandeza superior à da manta de espuma de borracha nitrílica (0,037 W/m.K). Na configuração de menor custo (protótipo 1), utilizando a manta térmica de 10mm a temperatura da água aumentou em dobro, comparado ao reservatório sem isolamento térmico. O melhor rendimento de isolamento térmico é obtido com o protótipo 4: caixa d'água isolada, com manta de 10 mm, instalada dentro da outra caixa d'água. Nessa configuração desejou-se manter uma camada de ar entre as paredes das duas caixas d'água, por ser um bom isolante térmico e sem custos (condutividade térmica 0,025 W/m.K). Porém, como as correntes de convecção do ar tendem a reduzir o seu efeito de isolamento térmico, esse espaço foi relativamente reduzido com a camada (10 mm) da manta térmica, que reveste a caixa d'água interna (100 L).

A Fig. 6 apresenta valores médios (semanas de coletas diárias) das diferenças de temperaturas da água em relação à temperatura ambiente (ΔT) para todos protótipos ao longo de 24 horas. Observa-se que a ΔT do protótipo 3, sem isolamento térmico, teve seu menor valor de 5°C às 8 h da manhã. Os protótipos 1, 2 e 4, com isolamento térmico, apresentaram os menores valores de ΔT entre 13 e 20°C, verificando-se, ainda, uma defasagem de 2 horas (às 10 h) em relação ao protótipo não-isolado, bem como um menor transitório térmico (Fig. 6); pois nesse horário a radiação solar inicia o aquecimento da água.

As flutuações periódicas de ΔT para os protótipos 1 e 2, ao longo de 24 horas, não são estatisticamente significativas, observadas as dispersões e medianas representadas pelos diagramas *box-plot* (Fig. 7). Deste modo, o uso de uma manta com 10 mm de espessura para isolamento térmico do reservatório (protótipo 1) pode ser uma escolha econômica adequada em contrapartida a uma manta de 15 mm. O protótipo 4, configuração caixa isolada com manta dentro de caixa, apresenta significativo aumento das flutuações de ΔT ao longo de todo o período noturno, cerca de 5°C acima dos protótipos 1 e 2 (Fig. 7) e mantendo um ΔT de 22°C acima de um sistema não isolado termicamente. Esta é uma opção favorável para um sistema de isolamento térmico de custo relativamente muito baixo comparado aos *boilers* ou reservatórios térmicos convencionais (conforme análise de custos adiante). Ainda que possa parecer inusitado adquirir duas caixas d'água de volumes distintos e usar, efetivamente, uma para armazenar água quente.

No período diurno, os protótipos com isolamentos térmicos (1, 2 e 4) não apresentam diferenças significativas nas flutuações de ΔT e seus valores são mínimos (Fig. 7). Isto porque os coletores solares estão expostos ao período de máxima radiação solar, com alta vazão de água quente para os reservatórios térmicos e a temperatura ambiente nesses horários é maior. Por sua vez, um aumento significativo no transitório térmico do ΔT para o protótipo 4 (Fig. 6 e 7) é observado no período compreendido entre o final da tarde e início da noite; isto é, quando a insolação é insuficiente para a eficiência do coletor solar e a temperatura ambiente diminui.

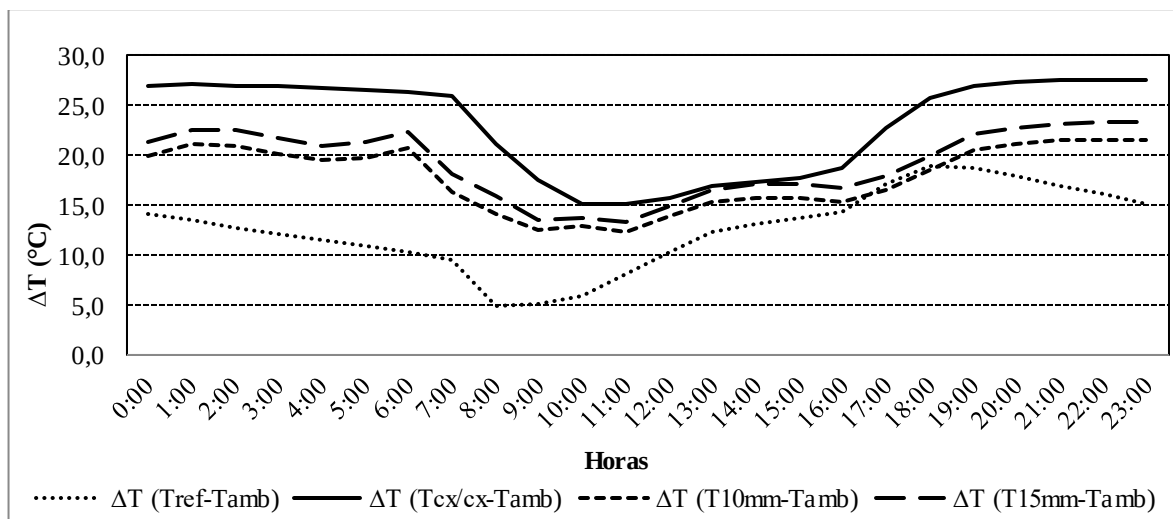


Figura 6 – Curvas das “diferenças de temperatura da água nos reservatórios em relação à temperatura ambiente” no período de 24 horas (valores médios semanais).

O gráfico da Fig. 8 apresenta as flutuações senoidais diárias das diferenças de temperatura da água em relação à temperatura mínima da água nos reservatórios (protótipos 1, 2, 3 e 4); bem como, a diferença entre a temperatura ambiente em cada horário em relação à temperatura mínima do dia (os valores são médias de várias semanas de medidas). Observa-se a maior variação das diferenças de temperatura, ou amplitude térmica, no reservatório de água sem isolamento térmico (protótipo 3) de aproximadamente 20°C ao longo do dia, seguindo a mesma amplitude da variação da temperatura ambiente. Os reservatórios com isolamento térmico (protótipos 1, 2 e 4), como esperado, apresentam

menores amplitudes das curvas, aproximadamente 8°C; isto é, menor variação nas diferenças de temperatura da água a cada hora em relação à sua mínima temperatura.

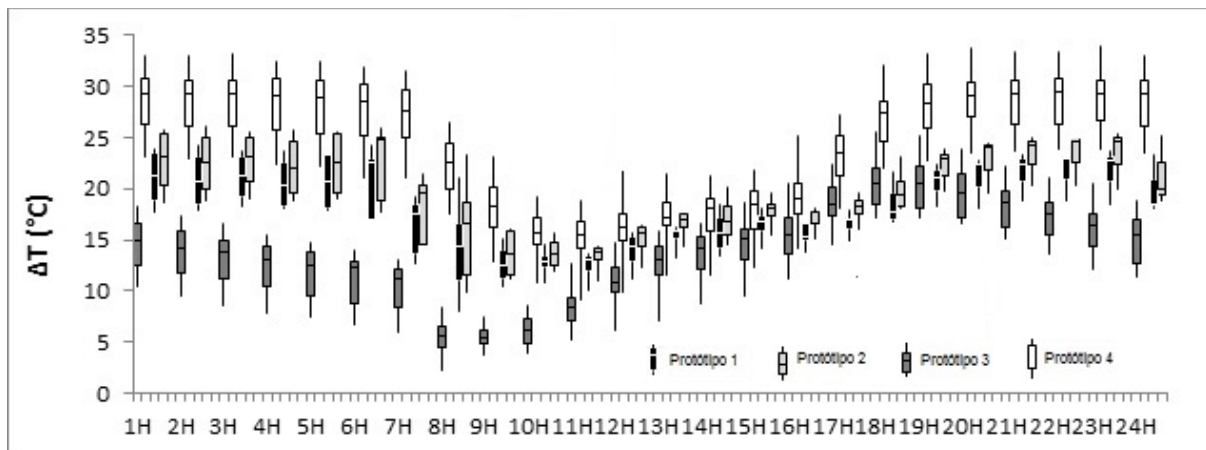


Figura 7 – Gráfico *Box-Plot* das “diferenças de temperatura da água nos reservatórios em relação à temperatura ambiente” no período de 24 horas (valores médios semanais).

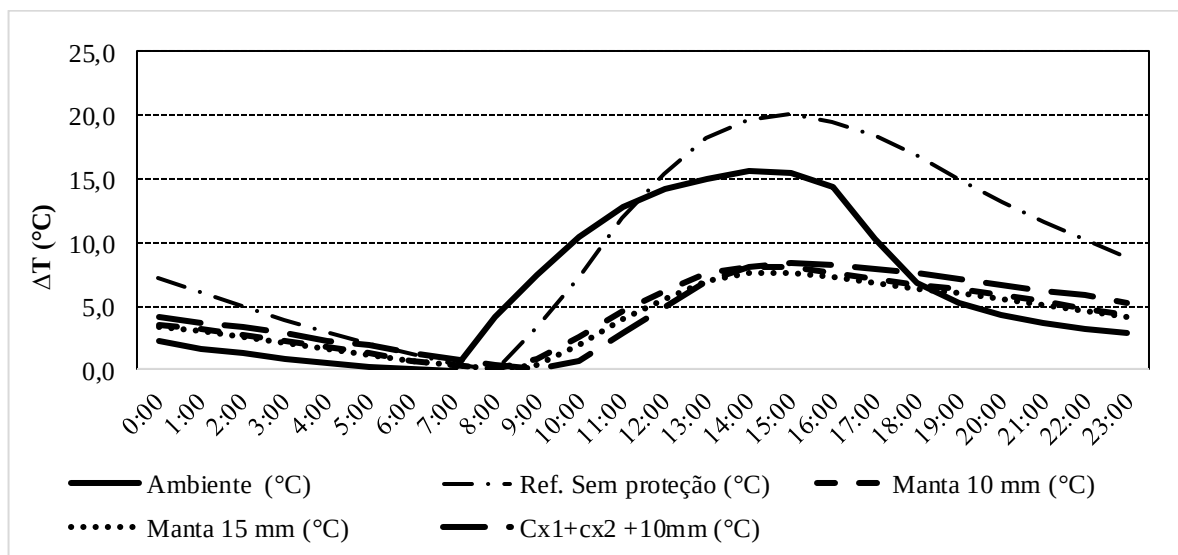


Figura 8 -Curvas no período de 24 horas para as “diferenças de temperatura da água em relação à temperatura mínima da água” em cada reservatório (valores médios semanais). A curva Ambiente é relativa à diferença entre a “temperatura

3.1 Análise dos custos

Uma estimativa dos preços (Tab. 2) foi realizada para os materiais empregados na construção dos sistemas de baixo custo para aquecimento de água por energia solar, constituídos dos coletores CSBC e as quatro opções de protótipos de reservatórios estudadas. Porém, nessa análise, aumentou-se o volume útil dos reservatórios para 250 L e optou-se por duas placas de coletores solares CSBC (total 1,5 m²). Esta maior escala, em todos os componentes, possibilita comparações com os sistemas convencionais de 200 a 250 L (coletores e reservatórios térmicos), mais comuns no comércio.

A isolamento térmica do reservatório de água com a manta de espuma elastomérica de menor espessura (10 mm) aumenta os custos em R\$ 208,60 (cerca de 43 %), em relação a um reservatório sem isolamento; ou em R\$ 103,70 (21%) se for usada fita plástica para fixar a manta, em vez de adesivo específico (ambos foram avaliados satisfatoriamente). O custo-benefício é favorável ao uso de uma manta de 10 mm, protótipo 1 (R\$ 694,30) em relação à manta de 15 mm, protótipo 2 (R\$ 783,44), considerando-se os resultados experimentais no período noturno ($\Delta T \sim 2^\circ\text{C}$ entre os dois tipos de mantas). Um investimento adicional de R\$ 126,90 no protótipo 4 (custo da segunda caixa d'água de 310 L), em relação ao protótipo 1, pode ser aceitável considerando o melhor desempenho nos estudos de isolamento térmica dos reservatórios.

Por outro lado, R\$ 2.600 é o preço médio para um sistema de aquecimento solar (2 placas, 200 L, tipo termossifão), comercializado por quatro fabricantes, construídos em cobre e/ou alumínio, vidro e reservatórios isolados.

Comparando com os sistemas convencionais, os sistemas de baixo-custo estudados custam apenas - um terço - na opção do protótipo 4 e pouco mais de - um quarto - para o protótipo 1, para um volume de 250 L de água aquecida.

Tabela 2 – Custos estimados para construção dos sistemas de aquecimento de água (reservatórios e coletores CSBC) coletados na cidade de Taubaté e região em dezembro de 2019

Valor total por sistema de aquecimento solar:			
Coletores CSBC (2 placas = 1,5 m²) + Reservatório de Água (250 L útil)			
Protótipo	Custo total (R\$)	Diferença (R\$) com referência	% em relação à referência
Referência (sem proteção térmica)	R\$ 485,70		
Com manta térmica de 10mm	R\$ 694,30	R\$ 208,60	42,9
Com manta térmica de 15mm	R\$ 783,44	R\$ 297,73	61,3
Com manta de 10mm e Caixa dentro de Caixa	R\$ 821,20	R\$ 335,50	69,1

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram desenvolvidos reservatórios térmicos de baixo custo para armazenamento de água aquecida por coletores solares de baixo custo (CSBC), sistemas todos construídos em materiais termoplásticos. Caixas d' água comuns da construção civil foram utilizadas e isoladas com mantas térmicas de espuma elastomérica, comerciais, bem como sistemas de caixa de água dentro de outra caixa isolada com manta. Os experimentos foram conduzidos, ao longo de vários meses, com quatro tipos de protótipos de reservatórios em escala de laboratório (volume de 100 L), quanto ao tipo de isolamento térmico: caixa d'água revestida com manta de 10 mm de espessura, caixa d'água com manta de 15 mm, caixa d'água revestida com manta de 10 mm e inserida dentro de outra (150 L) e caixa d'água sem isolamento, como referência. Verificou-se um bom desempenho dos reservatórios térmicos, na conservação da água aquecida, em especial no horário crítico das 6 h da manhã do dia seguinte. Nesse horário, a temperatura média da água acima da temperatura média do ambiente (ΔT) foi de 20,7°C, 22,5°C e 26,4°C, respectivamente, para os reservatórios com manta de 10 mm, manta de 15 mm e caixa-dentro-caixa (no reservatório não-isolado foi medido um ΔT de 10,4°C). No período noturno, as diferenças de temperatura ΔT , entre água aquecida no reservatório e a temperatura ambiente, não foram significativas entre os protótipos com mantas de 10 e 15 mm, indicando um custo-benefício melhor para uso da manta de 10 mm.

Entretanto, na configuração caixa isolada dentro de outra caixa d'água, os ΔT foram significativos no período noturno, cerca de 5°C acima da água armazenada nos protótipos isolados com os dois tipos de mantas; e um $\Delta T = 22^\circ\text{C}$ acima do sistema não isolado. Esta configuração é uma opção favorável economicamente para um sistema de isolamento térmico de baixo custo, custando apenas um terço do preço dos sistemas de aquecimento solar convencionais (200 L), ou até de um quarto do preço para o sistema com manta de isolamento térmico de 10 mm. Nesse sistema, foram medidas temperaturas da água até 16°C acima daquela medida em reservatório sem isolamento térmico, às 6 h do dia seguinte, dispondo água aquecida para banhos matutinos.

Portanto, verifica-se a viabilidade técnico-econômica destes simples sistemas térmicos para armazenamento de água quente combinados com coletores solares de baixo custo (CSBC), apresentando desempenho térmico adequado, fácil construção e, principalmente, custos acessíveis às famílias de baixa renda. Contribui, também, na redução no consumo de energia elétrica no país, bem como nas questões ambientais e de sustentabilidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos alunos da FEQ/Unicamp: Renato C. Pereira, Valdir A. Assis Jr., Bruna R. Prado, Tatiane Pinto, José C. P. Ferreira, Samuel Mello, Robson Takao, Matheus R. Carminatti, Peterson Zilli, Emerson de Jesus Silva e Larissa M. S. Benjamin; e aos colegas Prof. Italo A. G. Rispoli (Unisal), Profa. Elizabeth Pereira (PUC-BH), Prof. João S. C. Campos (FEQ/Unicamp), Profa. Jane T. Fantinelli, Agustin Woelz, Alexandre M. Andrade, Hugo D. Chirinos, Isabel Carballo e Natalia Forcat.

REFERÊNCIAS

- Alva, G.; Liu, L.; Huang, X.; Fang, G., 2017, Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renew. Sust. Energy Rev.* 68, pp. 693-706.
- Anderson, B.; 1977, *Solar Energy: Fundamentals in Building Design*, N. York, McGraw-Hill.
- ArmWin, Insulation Thickness Calculator; 2018, Armacell, disponível em <http://armwin.armacell.com>.
- Ashby, M. F.; 1989, On the Engineering Properties of Materials, *Acta Metall.*, v.37, n.5, pp.1273-1293.

- Ashby, M. F.; 2005, *Materials Selection in Mechanical Design*, 3rd Edition, Butterworth-Heinemann.
- Bartoli, J.R.; Aquecedor Solar de Baixo Custo, 1999, Auxílio à Pesquisa - Pesquisa Inovativa em Pequenas Empresas - PIPE, Fapesp, <https://bv.fapesp.br/pt/auxilios/101/aquecedor-solar-de-baixo-custo>.
- Bartoli, J.R.; Chirinos, H. D.; Andrade, A. M.; Woelz, A.; 2004, Development of Low Cost Solar Water Heater Using Thermoplastic Materials; Renewable Resources and Renewable Energy: A Global Challenge, ICS-UNIDO, Intern. Conf., Trieste.
- Bartoli, J.R.; Prado, B. R.; Pereira, R. C., 2011, Study of the Natural Aging of PVC Flat-plate Absorber Used for Low Cost Solar Collectors., , EPF 2011, XII GEP Congress, Granada, Spain
- Tomé, M. de C., 2014, Análise do impacto do chuveiro elétrico em redes de distribuição no contexto da tarifa horossazonal; Dissertação de Mestrado, FEEC- Unicamp, Campinas.
- CSBC, Manual de Construção de Coletor Solar de Baixo Custo - Sole Mio; 2008, FEQ/Unicamp, Campinas, 32 p., disponível também em <https://vdocuments.mx/document/manual-de-construcao.html>.
- Duffie, J.A.; Beckman, W.A.; 1991, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd.ed., J.Wiley and Sons, New York.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética, 2018; <http://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-publica-o-anuario-estatistico-de-energia-eletrica-2018>.
- Liu, M.; Saman, W.; Bruno, F., 2012, Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 16, pp. 2118-2132.
- NBR.15.747/2009; Sistema solar térmico e seus componentes. Coletor solar parte 1; ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Oliveski, R. de C.; Krenzinger, A.; Vielmo, H. A., 2003, Comparison Between Models for the Simulation of Hot Water Storage Tanks, *Solar Energy*, v. 75, n.2, pp. 121-134.
- Savicki, D. L.; Krenzinger, A.; Vielmo, H. A., 2006, Estudo Numérico-Experimental da Transferência de Calor em Reservatórios Térmicos Cilíndricos Horizontais, 11th Brazilian Cong. of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT, Brazilian Soc. of Mechanical Sciences and Engineering - ABCM, Curitiba, 12 p.
- Pereira, R. C.; Shiota, R. T.; Mello, S. F.; Assis, V. Jr.; Bartoli, J.R., 2006 Eficiência Térmica de Coletores Solares de Baixo Custo dos Materiais (CSBC); 17^o CBECIMat- Cong. Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais de Foz do Iguaçu, pp. 9607-9617.
- Pereira, R.C.; Netzel, M.A.; Assis, V. Jr.; Vizintim, J.V.; Campos, J. S. C.; Bartoli, J. R.; 2005, Construção e Teste de Coletores Solares de Baixo Custo a Base de PVC; 8^oCBPol-Cong. Brasil. de Polímeros, Águas de Lindóia, 444-445.
- Prado, B.R.; 2010; Características físico-químicas e propriedades mecânicas dos materiais a base de PVC dos Coletores Solares de Baixo Custo (CSBC) até 4 anos de uso; Relatório de Iniciação Científica, FEQ, Unicamp, Campinas.
- Rispoli, I. G.; 2001, Estudo do aproveitamento da energia solar para aquecimento de água em edificações unifamiliares de baixa renda, Dissertação de Mestrado, FEC – Unicamp, Campinas.
- Rodolfo Jr., A.; Nunes, L.R.; Ormanji, W.; 2002, *Tecnologia do PVC*, Braskem, Pro-Editores, S. Paulo.
- Rodríguez-Hidalgo, M.C.; Rodríguez-Aumente, P.A.; Lecuona, A.; M. Legrand, M.; Ventas, R. 2012, Domestic hot water consumption vs. solar thermal energy storage: The optimum size of the storage tank. *Appl. Energy*, 97, pp.897-906.
- Wang, Y.; Tang, B.; Zhang, S., 2012, Novel organic solar thermal energy storage materials: efficient visible light-driven reversible solid–liquid phase transition. *J. Mater. Chem.*, 22, pp. 18145-18150.

STUDY ON LOW COST SYSTEMS FOR SOLAR ENERGY WATER HEATING USING SOLAR COLLECTORS AND THERMAL RESERVOIRS ALL MADE WITH POLYMERIC MATERIALS

Abstract. *The aim of this study is to investigate low-cost thermal reservoirs for hot water storage by low-cost solar collectors (CSBC), all made of commodities polymers, aiming to minimize the heat loss of water at night. The reservoirs are cylindrical water tanks, common, manufactured in thermoplastic material (polyethylene), as an alternative to metallic materials of higher cost, as the stainless steel used in conventional thermal reservoirs. The thermal insulations of the water boxes were made with thermal metallized elastomeric foam, as well as water box systems inside another insulated box with that foam. In turn, CSBCs are constructed with PVC ceiling plates, without the greenhouse effect (no transparent coverage). A brief history of CSBC is presented, 20 years after its development with the support of the PIPE-Fapesp programme. They stand out for adequate thermal efficiency and are a technical-economic option to traditional solar collectors for water heating, which use higher value materials: copper or aluminum pipes, glass. The experimental results of this study demonstrated the good performance of low-cost thermal reservoirs, measuring a water temperature of 16°C above that measured in a reservoir without thermal insulation, at 6 a.m. next day. In this way, they supply preheated water for the bath electrical shower at minimal charge, in winter, or even without charge in summer, especially for morning baths. Besides, CSBC solar collector and low-cost thermally insulated reservoirs systems contribute for significant savings in low-income household; and have an impact on the reduction of electricity consumption in the country, as well as on environmental and sustainability issues.*

Keywords: Solar Energy; Low Cost Solar Collector, Water Reservoir, Thermal insulation, Energy saving.