

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

ANDRÉ DE CARVALHO

**ANÁLISE DE COLETOR-RESERVÁTARIO SOLAR DIRECIONADO A
AQUECIMENTO DOMÉSTICO DE ÁGUA**

Florianópolis

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

ANDRÉ DE CARVALHO

**ANÁLISE DE COLETOR-RESERVÁTARIO SOLAR DIRECIONADO A
AQUECIMENTO DOMÉSTICO DE ÁGUA**

Projeto de Dissertação de Mestrado submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção da Qualificação.

ORIENTADOR: SERGIO COLLE

Florianópolis

2015

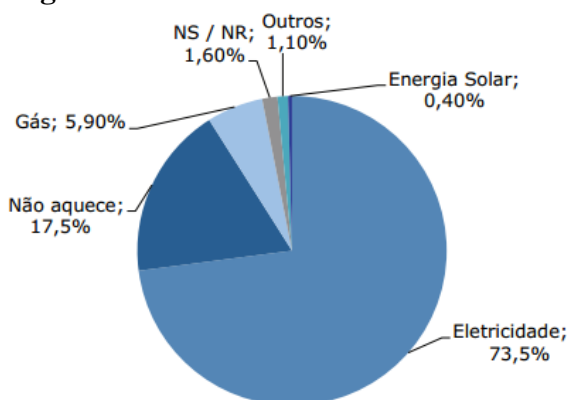
SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	4
1.1	OBJETIVO GERAL.....	5
1.2	CONTRIBUIÇÕES	6
2.	CRONOGRAMA.....	8
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA PRELIMINAR.....	9
3.1	CONCEPÇÕES DE ICS EXISTENTES	9
3.2	METODOLOGIAS UTILIZADAS EM TRABALHOS ANTERIORES.....	12
4.	METODOLOGIA.....	13
	REFERÊNCIAS	15

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento doméstico de água para banho na maioria dos domicílios brasileiros é realizado por meio do chuveiro elétrico. A Figura 1, proveniente de uma pesquisa domiciliar realizada em 2012 pelo Procel (ELETROBRAS PROCEL, 2012), ilustra o percentual que cada fonte ocupa no aquecimento de água, em que se destaca a presença de mais de 70 % de energia elétrica e menos de 1 % de energia solar.

Figura 1 - Aquecimento de água nos domicílios brasileiros



Sob o ponto de vista termodinâmico, a conversão integral de energia elétrica em calor é conhecida pela total ineficiência de Segunda Lei, mas os problemas dos chuveiros vão além disso. Dentre as consequências nocivas do seu uso, pode-se destacar que este representa 43 % do consumo de energia elétrica no horário de pico, entre as 18h e 21h, horário em que o brasileiro costuma tomar banho diariamente (ANEEL, 2010). Tal pico de consumo de eletricidade acarreta custos adicionais ao sistema elétrico, em decorrência do superdimensionamento necessário para supri-lo. Ainda, o consumidor arca com a fatura de energia elétrica mais cara, enquanto poderia optar por alternativas como a energia solar.

No recente cenário problemático do sistema elétrico nacional, em que os reservatórios das hidrelétricas – a principal fonte para geração de energia elétrica no Brasil (EPE, 2014) – estão em níveis reduzidos e a tarifa tem sido elevada (FOLHA DE S. PAULO, 2015), torna-se ainda mais urgente o desenvolvimento e a difusão de meios para redução do consumo elétrico. Nesse sentido, destaca-se o trabalho de Passos (2011), que demonstrou a viabilidade técnica e econômica

da agregação de sistemas solares domésticos de aquecimento de água em todas as cinco regiões do Brasil. Os sistemas analisados empregavam coletores solar de placa plana e circulação passiva de água. Para o setor elétrico, os resultados indicaram uma economia de pelo menos R\$ 560 por cada chuveiro elétrico que não seja instalado (PASSOS, 2011)

A Figura 2 mostra que ainda é observado um crescimento no mercado de chuveiros elétricos no Brasil (ELETROBRAS PROCEL, 2012). Desse fato, infere-se que o consumidor brasileiro tende a optar por sistemas de baixo custo inicial e de simples instalação e manutenção, em detrimento de economia em custos de operação.

Figura 2 - Percentual de residências brasileiras com chuveiro elétrico

chuveiro elétrico – % de residências com o dispositivo		
	1988 ^(a)	2005 ^(b)
Brasil	67,6 %	73,1 %
Norte	7,9 %	4,0 %
Nordeste	15,2 %	30,3 %
Sudeste	83,6 %	90,7 %
Sul	88,2 %	98,6 %
Centro-Oeste	73,0 %	85,1 %

(a) 10.818 pesquisas de campo em 27 concessionárias de energia elétrica
 (b) 9.847 pesquisas de campo em 21 concessionárias de energia elétrica

Os coletores-reservatório integrados, ICS (do inglês, *integrated collector storage*), constituem uma opção simplificada de sistema solar de aquecimento, porque, como sugere a denominação, combinam coletor solar e reservatório térmico em um único componente, reduzindo os custos de instalação, diminuindo a quantidade de tubulações e conexões necessárias e dispensando bombas e controladores. Dentro dessa perspectiva, espera-se que tais sistemas tenham maior aceitação no mercado brasileiro, desde que apresentem viabilidade técnica e econômica comparáveis aos sistemas estudados por Passos (2011).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é analisar, por meio de simulação numérica, o desempenho térmico de uma concepção de coletor-reservatório integrado, visando aperfeiçoá-lo. Nesse sentido, propõe-se a investigação da geometria do reservatório do ICS, com enfoque na geometria cilíndrica, e também avaliação detalhada de efeitos térmicos e fluidodinâmicos

ocasionados por aspectos construtivos como presença de chicana interna e isolamento térmico semitransparente, conhecidos por “honeycombs”.

1.1.1 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral do trabalho, podem-se elencar os objetivos específicos a serem atingidos ao longo dos períodos determinados no cronograma, que se encontram no Capítulo 2, quais sejam:

1. Realizar uma revisão bibliográfica a fim de levantar os principais trabalhos a respeito de coletores-reservatório integrados, as concepções existentes e as metodologias de estudo já empregadas.
2. Selecionar uma concepção de ICS adequada à realidade brasileira.
3. Estabelecer considerações e simplificações para a simulação do ICS.
4. Simular a concepção escolhida em um software comercial de fluidodinâmica computacional (CFD) e avaliar seu desempenho térmico. Comparar com resultados da literatura.
5. Avaliar a influência de parâmetros de dimensionamento no comportamento do sistema.
6. Construir um modelo simplificado com o objetivo de realizar simulações transientes e otimizações ao longo de todo um ano típico.
7. Escrever a dissertação de mestrado.

1.2 CONTRIBUIÇÕES

De modo geral, pretende-se que este trabalho contribua para a promoção do uso de energia solar no Brasil pelo emprego de coletores-reservatório integrados. Como já abordado, estes equipamentos apresentam potencial de popularização entre os consumidores brasileiros devido a sua simplicidade e facilidade de instalação se comparados a sistemas de aquecimento

solar convencionais. Nesse sentido, o papel deste trabalho é apresentar um estudo detalhado do desempenho térmico de um ICS e, a partir do modelo CFD otimizado, construir um modelo simplificado que permita a análise de indicadores anuais de desempenho, como fração solar e eficiência de coletor, em diversas localidades.

2. CRONOGRAMA

A organização do cronograma foi realizada com base nos objetivos específicos do trabalho já identificados e com vistas a realizar a defesa da dissertação de mestrado em dezembro de 2015. O período destinado ao cumprimento de cada objetivo está apresentado no cronograma na Tabela 1.

Tabela 1 - Cronograma das atividades

Objetivo	jun/15	jul/15	ago/15	set/15	out/15	nov/15	dez/15
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

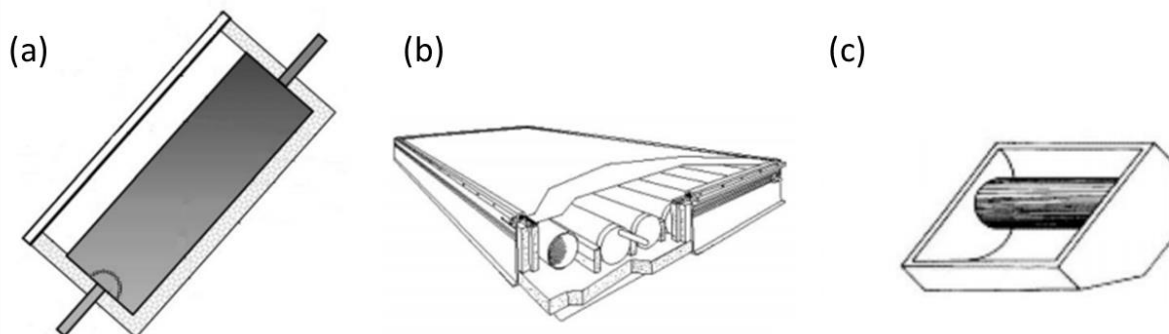
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA PRELIMINAR

Na revisão bibliográfica preliminar foi dado enfoque ao levantamento das concepções de coletores-reservatório integrados (ICS) existente e também à metodologia que tem sido empregada no estudo desses sistemas. É importante salientar que métodos computacionais em mecânica dos fluidos e transferência de calor, ainda não estão contemplados neste capítulo, contudo constarão na versão final da revisão bibliográfica.

3.1 CONCEPÇÕES DE ICS EXISTENTES

Smyth, Eames e Norton (2006) apresentaram uma extensa revisão acerca dos progressos em pesquisa de coletores-reservatório integrados. O autor reporta a existência de ao menos três concepções de ICS: (a) o reservatório absorvedor único, (b) múltiplos vasos absorvedores e (c) o tanque com concentrador parabólico, ilustrados na Figura 3.

Figura 3 - Concepções de ICS existentes: (a) reservatório absorvedor único, (b) múltiplos vasos absorvedores e (c) tanque com concentrador parabólico

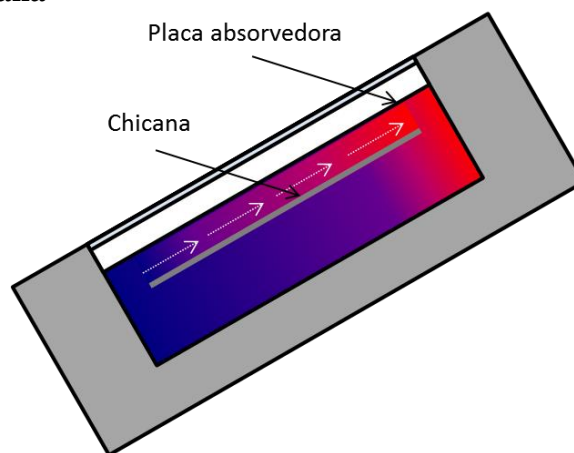


O presente trabalho dará enfoque aos ICS de reservatório absorvedor único, por dois motivos em particular. Primeiro, em se comparando com os múltiplos tubos absorvedores, o reservatório único é construtivamente mais simples. Segundo, é mais adequado às características climáticas brasileiras do que o concentrador, porque o Brasil, especialmente a Região Sul, não é caracterizado por elevada incidência de radiação direta (PEREIRA *et al.*, 2006).

O reservatório absorvedor é a concepção mais antiga de ICS, já disponível comercialmente nos EUA desde o final do século 19, tendo alcançado alta popularidade no Japão nos anos 1950 (SMYTH, EAMES e NORTON, 2006). A partir desta concepção, foram propostas algumas modificações com a finalidade de aumentar a eficiência do coletor e reduzir perdas noturnas.

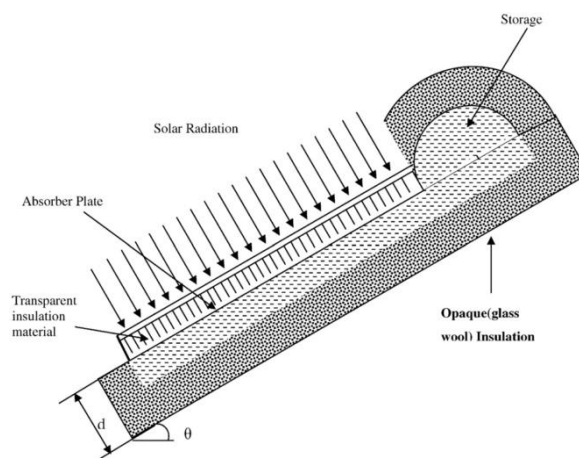
Van Straaten (1976) propôs o uso de uma chicana, logo abaixo da placa absorvedora, com o objetivo de direcionar o escoamento de água quente ascendente, diminuir efeitos de mistura e aumentar a estratificação do tanque, como ilustrado pela Figura 4. No entanto, o autor não apresentou nenhum estudo sobre sua proposta. Posteriormente, uma série de autores analisou o efeito da chicana em estudos com acentuada semelhança (GARG e RANI, 1982; PRAKASH, GARG e DATTA, 1983; SOKOLOV e VAXMAN, 1983; TIWARI e DHIMAN, 1983; VAXMAN e SOKOLOV, 1985; ECEVIT, CHAIKH WAIS e AL-SHARIAH, 1990).

Figura 4 - ICS com chicana



Há também propostas de alterações na geometria do reservatório. Mohamad (1997), Kaushik *et al.* (1994), Ecevit *et al.* (1989) e Sokolov e Vaxman (1983) consideraram o reservatório com secção triangular, Ziapour e Aghamiri (2014) e Tarhan *et al.* (2006) estudaram secção trapezoidal e Kaptan e Kilic (1996) investigaram o desempenho de coletores-reservatório cilíndricos dotados de chicana interna. Kumar e Rosen (2011), Sridhar e Reddy (2007) e Sopian *et al.* (2004) analisaram uma extensão superior termicamente isolada do reservatório, a fim de evitar perdas noturnas, conforme ilustrado pela Figura 5.

Figura 5 - Reservatório superior termicamente isolado (SRIDHAR; REDDY, 2007)



Ainda, é importante ressaltar alguns aspectos construtivos já apresentados, como emprego de isolantes térmicos semitransparentes, *honeycombs*, (KAUSHIKA, RAY e PRIYA, 1990; KAUSHIKA e REDDY, 1999; REDDY e KAUSHIKA, 1999; CHAURASIA e TWIDELL, 2001), o uso de bomba de circulação e aquecimento indireto (GERTZOS e CAOURIS, 2008; GERTZOS, PNEVMATIKAKIS e CAOURIS, 2008), modificações na textura da superfície absorvedora (KUMAR e ROSEN, 2010) e emprego de meios porosos com alta absortividade (TAHERI, ZIAPOUR e ALIMARDANI, 2013).

Fraisse *et al.* (2013) apresentaram alguns coletores-reservatório integrados disponíveis comercialmente no mercado europeu, contudo não revelaram detalhes construtivos internos destes coletores. Esses ICS estão ilustrados na Figura 6.

Figura 6 - ICS disponíveis no mercado europeu: (a) Sun Hides, (b) Hot Harry, (c) PopSol, (d) AST Solar Industry



(a)

(b)

(c)

(d)

3.2 METODOLOGIAS UTILIZADAS EM TRABALHOS ANTERIORES

Muitos dos estudos na área de coletores-reservatório integrados adotaram abordagem experimental para a análise do desempenho dos equipamentos, dos quais se destacam Schmidt *et al.* (1988), Faiman (2001) e Sopian *et al.* (2004), devido ao fato de terem dado importância ao desempenho anual dos coletores e ao levantamento da curva de eficiência. A maior parte dos trabalhos experimentais dá enfoque apenas a poucos dias do ano, como Garg e Rani (1982).

Nos trabalhos em que foi conduzida a modelagem dos coletores, a maioria dos autores considera o problema transiente de transferência de calor considerando temperatura uniforme no reservatório e emprega correlações conhecidas da literatura para o cálculo de coeficientes de transferência de calor, como é o caso de Garg e Rani (1982), Goetzberger e Rommel (1987), Currie *et al.* (2008), Mohsen *et al.* (2009) e Kumar e Rosen (2011). Dentre esses trabalhos, destaca-se Goetzberger (1987) como único que trata do conceito de fração solar e perfil de consumo de água quente, os demais se ativerem a variações de temperatura e ao comportamento da eficiência do coletor em função do tempo, em alguns dias do ano. Na presença de chicana, é reportado o uso de expressões analíticas para cálculo da vazão mássica no canal (MOHAMAD, 1997; ZIAPOUR e AGHAMIRI, 2014)

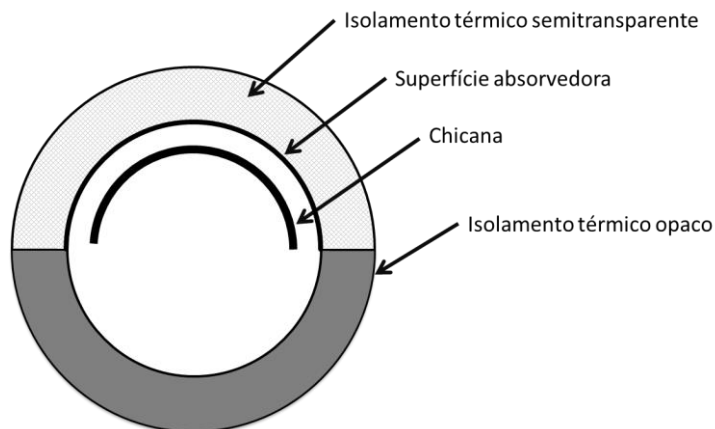
Outros autores deram atenção à solução numérica dos perfis de velocidade e temperatura no interior dos coletores. Muitos deles direcionaram esforços à análise do problema de transferência de calor em cavidade, com pouca atenção às particularidades da energia solar (SRIDHAR e REDDY, 2007; HENDERSON *et al.*, 2007; GERTZOS e CAOURIS, 2007; BORELLO *et al.*, 2012). Entre os trabalhos que empregaram CFD, Fraisse *et al.* (2013) merecem ênfase por terem realizado análises mais completas da eficiência do coletor, realizando a simulação ao longo de todo um ano típico e considerando perfis de consumo de água quente.

4. METODOLOGIA

Propõe-se a simulação numérica do escoamento e da transferência de calor no coletor-reservatório integrado, por meio de um software comercial de CFD. Trata-se de um problema de convecção natural em cavidade inclinada (BEJAN, 2004). Devido à variação da temperatura ambiente e da radiação incidente e também à capacitância térmica do reservatório, é possível que o ICS nunca atinja o regime permanente (FAIMAN, 1984). Portanto, deve-se realizar a simulação em regime transiente, conforme análise realizada por Patterson e Imberger (1980).

A Figura 7 ilustra uma concepção preliminar de coletor-reservatório cilíndrico dotado de chicana e isolamento térmico semitransparente, a que será dado enfoque neste trabalho.

Figura 7- Secção transversal de ICS cilíndrico com chicana



Importantes considerações a respeito da simulação ainda precisam ser definidas, as quais interferem diretamente no tempo computacional, como o passo tempo, o período simulado, a modelagem da radiação térmica e outros aspectos relacionados ao escoamento. Essas especificações devem ser feitas de modo que o tempo computacional não seja demasiado grande, o que limita a quantidade de análises realizadas, mas assegurando a validade da solução, baseada na literatura de transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional.

O principal indicador de desempenho utilizado para avaliar e comparar os coletores-reservatório é a eficiência de coletor. Contudo, a alta capacitância térmica dos ICS impossibilita

a abordagem da curva de eficiência instantânea, derivada da equação de Hottel-Whillier para coletores de placa plana (DUFFIE e BECKMAN, 2006). Nesse sentido, Faiman (1984) definiu a máxima energia útil, MUE (do inglês, *maximum useful energy*), como equivalente à eficiência para coletores integrados, a qual se comporta como a eficiência dos coletores de placa, mas emprega médias diárias para radiação incidente e diferença de temperatura. A partir do levantamento da curva da MUE, pode-se avaliar o desempenho anual do coletor-reservatório em diversas condições climáticas.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Estrutura tarifária para o serviço de distribuição de energia elétrica**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. 2010.
- BEJAN, A. **Convection Heat Transfer**. 3^a. ed. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- BORELLO, D. et al. Experimental and computational investigation of a new solar integrated collector storage system. **Applied Energy**, v. 97, p. 982-989, 2012.
- CHAURASIA, P. B. L.; TWIDELL, J. Collector cum storage solar water heaters with and without transparent insulation material. **Solar Energy**, v. 70, p. 403-416, 2001.
- CURRIE, J. et al. Modelling bulk water temperature in integrated collector storage systems. **Building Service Engineering**, v. 29, p. 203-218, 2008.
- DUFFIE, J. A.; A., B. W. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 3^a. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- ECEVIT, A.; AL-SHARIAH, A. M.; APAYDN, E. D. Triangular built-in-storage solar water heater. **Solar Energy**, v. 42, p. 253-265, 1989.
- ECEVIT, A.; CHAIKH WAIS, M. A. M.; AL-SHARIAH, A. M. A comparative evaluation of the performances of three built-in-storage-type solar water heaters. **Solar Energy**, v. 44, p. 23-36, 1990.
- ELETROBRAS PROCEL. **Energia solar para aquecimento de água no Brasil: contribuições da Eletrobras Procel e parceiros**. Rio de Janeiro. 2012.
- EPE. **Balço Energético Nacional - Ano Base 2013**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p. 288. 2014.
- FAIMAN, D. Towards a standard method for determining the efficiency of integrated collector-storage solar water heaters. **Solar Energy**, v. 33, p. 459-463, 1984.

FAIMAN, D.; HAZAN, H.; LAUFER, I. Reducing the heat loss at night from solar water heaters of the integrated collector-storage variety. **Solar Energy**, v. 71, p. 87-93, 2001.

FOLHA DE S. PAULO. Começam nesta segunda ajustes em conta de luz, com alta de até 48%, 2015. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2015/03/1596801-comecam-hoje-ajustes-em-tarifas-de-energia-com-aumentos-de-ate-48.shtml>>. Acesso em: Junho 2015.

FRAISSE, G. et al. Study of a new integrated solar collector. **Energy Procedia**, v. 57, p. 2506-2514, 2013.

GARG, H. P.; RANI, U. Theoretical and experimental studies on collector/storage type solar water heater. **Solar Energy**, v. 29, p. 467-478, 1982.

GERTZOS, K. P.; CAOURIS, Y. G. Experimental and computational study of the developed flow field in a flat plate integrated collector storage (ICS) solar device with recirculation. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 31, p. 1133-1145, 2007.

GERTZOS, K. P.; CAOURIS, Y. G. Optimal arrangement of structural and functional parts in a flat plate integrated collector storage solar water heater (ICSSWH). **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 32, p. 1105-1117, 2008.

GERTZOS, K. P.; PNEVMATIKAKIS, S. E.; CAOURIS, Y. G. Experimental and numerical study of heat transfer phenomena, inside a flat-plate integrated collector storage solar water heater (ICSSWH), with indirect heat withdrawal. **Energy Conversion and Management**, v. 49, p. 3104-3115, 2008.

GOETZBERGER, A.; ROMMEL, M. Prospects for integrated storage collector systems in Central Europe. **Solar Energy**, v. 39, p. 211-219, 1987.

HENDERSON, D. et al. Experimental and CFD investigation of an ICSSWH at various inclinations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, p. 1087-1116, 2007.

KAPTAN, I. N.; KILIC, A. A theoretical and experimental investigation of a novel built-in-storage solar water heater. **Solar Energy**, v. 57, p. 393-400, 1996.

KAUSHIK, S. C. et al. Transient analysis of a triangular built-in-storage solar water heater under winter conditions. **Heat Recovery Systems and CHP**, v. 14, p. 337-341, 1994.

KAUSHIKA, N. D.; RAY, R. A.; PRIYA, P. A honeycomb solar collector and storage system. **Energy Conversion and Management**, v. 30, p. 127-134, 1990.

KAUSHIKA, N. D.; REDDY, K. S. Thermal design and field experiment of transparent honeycomb insulated integrated-collector-storage solar water heater. **Applied Thermal Engineering**, v. 19, p. 145-161, 1999.

KUMAR, R.; ROSEN, M. A. Thermal performance of integrated collector storage solar water heater with corrugated absorber surface. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 1764-1768, 2010.

KUMAR, R.; ROSEN, M. A. Comparative performance investigation of integrated collector-storage solar water heaters with various heat loss reduction strategies. **International Journal of Energy Research**, v. 35, p. 1179-1187, 2011.

KUMAR, R.; ROSEN, M. A. Integrated collector-storage solar water heater with extended storage unit. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, p. 348-354, 2011.

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

MOHSEN, M. S.; AL-GHANDOOR, A.; AL-HINTI, I. Thermal analysis of compact solar water heater under local climatic conditions. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 36, p. 962-968, 2009.

PASSOS, L. A. A. **Um estudo sobre os impactos técnicos e econômicos da agregação do aquecimento solar de água nos domicílios brasileiros**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 98. 2011.

PATTERSON, J.; IMBERGER, J. Unsteady natural convection in a rectangular cavity. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 100, p. 65-86, 1980.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 1^a. ed. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006.

PRAKASH, J.; GARG, H. P.; DATTA, G. Effect of baffle plate on the performance of built-in storage type solar water heater. **Energy**, v. 8, p. 381-387, 1983.

REDDY, K. S.; KAUSHIKA, N. D. Comparative study of transparent insulation materials cover systems for integrated-collector-storage solar water heaters. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 58, p. 431-446, 1999.

SCHMIDT, C.; GOETZBERGER, A.; SCHMID, J. Test results and evaluation of integrated collector storage systems with transparent insulation. **Solar Energy**, v. 41, p. 487-494, 1998.

SMYTH, M.; EAMES, P. C.; NORTON, B. Integrated collector storage solar water heaters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 10, p. 503-538, 2006.

SOKOLOV, M.; VAXMAN, M. Analysis of an integral compact solar water heater. **Solar Energy**, v. 30, p. 237-246, 1983.

SOPIAN, K. et al. Performance of a non-metallic unglazed solar water heater with integrated storage system. **Renewable Energy**, v. 29, p. 1421-1430, 2004.

SRIDHAR, A.; REDDY, K. S. Transient analysis of modified cuboid solar integrated-collector-storage system. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, p. 330-346, 2007.

TAHERI, Y.; ZIAPOUR, B. M.; ALIMARDANI, K. Study of an efficient compact solar water heater. **Energy Conversion and Management**, v. 70, p. 187-193, 2013.

TARHAN, S.; SARI, A.; YARDIM, M. H. Temperature distributions in trapezoidal built in storage solar water heaters with/without phase change materials. **Energy Conversion and Management**, v. 47, p. 2143-2154, 2006.

TIWARI, G. N.; DHIMAN, N. K. Effect of the baffle plate on transient performance of built-in-storage water heater. **Energy Conversion and Management**, v. 23, p. 151-155, 1983.

VAN STRAATEN, J. F. **The utilization of solar energy part III: solar water heaters for low cost housing**. Proceedings of the second south-eastern conference on applications of solar energy. Baton Rouge, Louisiana, EUA: [s.n.]. 1976. p. 56-66.

VAXMAN, B.; SOKOLOV, M. Experiments with an integral compact solar water heater. **Solar Energy**, v. 34, p. 447-454, 1985.

ZIAPOUR, B. M.; AGHAMIRI, A. Simulation of an enhanced integrated collector-storage solar water heater. **Energy Conversion and Management**, v. 78, p. 193-203, 2014.