



ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MATERIAIS RECICLÁVEIS NO AQUECIMENTO DE ÁGUA POR MEIO DA ENERGIA SOLAR

Giuliana Chaves Moreira¹

Jocelito Saccol de Sá²

RESUMO

É crescente a preocupação em buscar fontes energéticas renováveis visando à ampliação da oferta de energia para o desenvolvimento econômico e sustentável. O Brasil apresenta um significativo potencial para aproveitamento de energia solar, devido à grande radiação incidente sobre o território nacional. Os valores de irradiação solar global no Brasil são superiores aos da maioria dos países Europeus, onde existem inúmeros projetos para aproveitamento da energia solar difundidos, alguns realizados com incentivos governamentais. O objetivo desse trabalho foi avaliar composições de coletores solares de baixo custo (CSBC), por meio do uso de materiais recicláveis visando analisar o desempenho de cada configuração proposta no aquecimento de água para uso residencial. Foram confeccionados seis modelos de CSBC, e aferidas as temperaturas na saída de água quente de cada reservatório. Os modelos analisados apresentaram comportamento térmico semelhante e a temperatura média da água no interior dos reservatórios se manteve significativamente superior à temperatura média do ambiente. O maior aquecimento da água foi verificado no coletor constituído por placas de PVC (Coletor F), e o menor, no coletor construído somente por tubos de PVC pintados de preto (Coletor A).

Palavras-chave: Reaproveitamento. Energia. Baixo custo.

¹ Tecnóloga em Saneamento Ambiental. Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e é bolsista da CAPES. E-mail: giulianachavesmoreira@gmail.com

² Engenheiro Agrícola pela Universidade Federal de Pelotas (1999), Mestre em Irrigação e Drenagem/Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (2002) e Doutor em Irrigação e Drenagem/Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (2006). E-mail: jocelito@pelotas.ifsul.edu.br

1 INTRODUÇÃO

Atualmente é crescente a preocupação em buscar fontes renováveis para a geração de energia elétrica visando à ampliação da sua oferta para atingir o desenvolvimento econômico e sustentável.

O Brasil apresenta um significativo potencial para aproveitamento de energia solar, devido à grande radiação incidente sobre o território nacional. Segundo Pereira et. al. (2006), o valor máximo de irradiação global ($6,5 \text{ kWh/m}^2$) ocorre no norte do estado da Bahia, próximo à fronteira com o estado do Piauí, e a menor irradiação solar global ($4,25 \text{ kWh/m}^2$) ocorre no litoral norte de Santa Catarina.

A radiação global ou total, a que a terra está submetida, é composta pela componente direta, que é aquela que não sofre espalhamento durante a sua trajetória devido à composição da atmosfera, e a componente difusa, que é a radiação que vem de todas as partes do céu. Ambas as componentes, somadas, constituem a radiação global ou total. (COIMBRA et. al., 2008)

Os valores de irradiação solar global no Brasil são superiores aos da maioria dos países Europeus, onde existem inúmeros projetos para aproveitamento da energia solar difundidos, alguns realizados com incentivos governamentais. (PEREIRA et. al., 2006)

O aproveitamento da energia solar para o aquecimento de água, a geração indireta de energia elétrica através do uso de concentradores solares e a conversão direta de energia solar em energia elétrica por meio do uso de células fotovoltaicas tem crescido principalmente em países desenvolvidos devido à viabilidade desta utilização, conforme mencionado por Reis (2009).

De acordo com Siqueira (2009), os principais tipos de coletores solares são os concentradores, que são utilizados quando se deseja atingir temperaturas mais altas, pois são projetados para este fim, e os de placa plana, que são utilizados para demanda de aquecimento um pouco superior à temperatura ambiente.

Dentre as formas utilizadas para aproveitamento da energia solar no Brasil, a energia solar para aquecimento de água é a mais disseminada. Apesar da indústria de aquecimento solar ser bem desenvolvida e estar em crescimento no país, deve haver uma maior consciência pública sobre as vantagens desta

tecnologia, para estimular ainda mais este crescimento. (MARTINS; PEREIRA, 2011).

O coletor solar plano convencional, segundo Bortoletto & Pezzuto (2012), apresenta um custo de aquisição elevado, devido ao alto custo dos materiais que são empregados na sua constituição, razão pela qual tem pouca propagação na sociedade. Porém, a utilização desses materiais contribui para uma maior eficiência desses coletores. Os materiais utilizados na confecção destes coletores são: uma caixa externa metálica, uma placa absorvedora de alumínio, tubos de cobre, um isolante térmico e uma placa de vidro que isola o sistema do meio externo.

Contudo, nos últimos anos, estudos foram realizados, visando desenvolver sistemas de aquecimento solar acessíveis à população de baixa renda, construídos com materiais recicláveis comumente encontrados nos resíduos sólidos de origem doméstica, comercial e industrial, como o desenvolvido no projeto da Sociedade do Sol, denominado aquecedor solar de baixo custo (ASBC). (SOSOL, 2009)

O aquecimento da água nos ASBC ocorre por meio de um processo natural de circulação de água dentro do coletor solar. A radiação solar incide sobre a superfície preta do coletor, esquenta e transmite o calor à água que está dentro dele, como são vasos comunicantes, a água fria empurra a água quente de volta para o reservatório. Este processo é chamado de termo-sifão. (SOSOL, 2009)

De acordo com Da Palma & Rosado (2011), diversas ONGs (Organizações não governamentais), institutos de pesquisa e sociedades sem fins lucrativos tem desenvolvido sistemas de aquecimento solar de baixo custo, porém o modelo mais difundido é o construído com garrafas PET (politereftalato de etileno), canos de PVC (cloreto de polivinila) e embalagens cartonadas do tipo longa vida.

A utilização de componentes de PVC, para diversas finalidades, resulta na diminuição do custo do sistema instalado e ainda permite um bom desempenho ao longo de toda a sua vida útil, com baixo custo de manutenção. (REIS, 2009)

Algumas das características que o PVC apresenta são: bom isolamento térmico, condutibilidade térmica (0,15 a 0,21 K/m.K) e resistência à intempéries, como sol, chuva e vento. Além disso, por ser um plástico, o PVC não sofre corrosão. (REIS, 2009)

Os ASBC não utilizam caixa e cobertura de vidro, que permitem a obtenção do efeito estufa dentro do coletor, portanto não permitem que a água atinja temperaturas muito elevadas (acima de 37°). Portanto os componentes de PVC que constituem estes aquecedores não sofrem efeitos de degradação, que são verificados nos mesmos quando expostos à temperaturas acima de 45°C. (REIS; LEITE; BARBOSA. 2011)

Um estudo realizado por Mendes & Vieira (2009), comparando o desempenho entre um aquecedor solar de baixo custo (ASBC) e seu similar convencional, apresentou resultados semelhantes entre os dois sistemas de aquecimento, obtendo-se valores de eficiência térmica de 41,9% para o coletor de PVC e 44,7% para o aquecedor convencional. Outros parâmetros foram analisados obtendo-se valores semelhantes de eficiência de boiler e temperatura final para ambos os sistemas aquecedores estudados.

Os ASBC apresentam desempenho similar aos sistemas de aquecimento convencional, porém, possuem uma vida útil menor comparado ao aquecedor convencional, cujas placas coletoras são confeccionadas utilizando serpentinas de cobre, pois os ASBC utilizam PVC na sua constituição, o que faz com que esse material sofra com os efeitos de degradação, provenientes da radiação solar incidente sobre eles. (MENDES; VIEIRA, 2009)

Atualmente, no Brasil, vem se difundindo modelos de ASBC que utilizam materiais termoplásticos, de uso comum na construção civil, como o modelo proposto por Sociedade do Sol (SOSOL, 2009), que utiliza placas de forro modulares de PVC e tubos de PVC comuns na sua construção. Seus principais objetivos são: melhoria social, preservação ambiental, conservação de energia, possibilidade de geração de empregos, economia financeira familiar e nacional (8 a 9% da demanda elétrica) e redução de emissões do gás estufa - CO².

Por meio de simulação computacional, Altoé, Filho e Carlo (2012) verificaram que a substituição do chuveiro elétrico por um sistema solar com apoio elétrico provocou uma redução média de 70% no consumo de energia elétrica destinada ao aquecimento de água doméstico e de 36% no consumo de energia total de uma residência.

Na literatura, são encontrados trabalhos utilizando outros materiais na constituição do CSBC, como: latas de alumínio, mangueiras de polietileno e lâmpadas fluorescentes.

Alano (2008) desenvolveu um modelo de aquecedor solar construído com garrafas de Politereftalato de etileno (PET) e embalagens cartonadas longa vida, com o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica e incentivar o reaproveitamento de embalagens pós-consumo.

Reis (2009) analisou o desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar utilizando um coletor solar alternativo de baixo custo com superfície absorvedora em chapas de forro de PVC. O sistema funcionou em regime termossifão, e foi utilizado para aquecimento de água destinada ao banho. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade do sistema solar de aquecimento, bem como sua facilidade de fabricação e montagem.

Lopo (2010) estudou um modelo de coletor solar de baixo custo confeccionado com aletas fabricadas com latas de alumínio recicladas, tubos de PVC e isolante térmico de placas de EPS (poliestireno expandido). Foi comprovada a viabilidade do sistema de aquecimento proposto, através da avaliação de parâmetros térmicos.

Nesse contexto, esse trabalho teve como objetivo avaliar composições de coletores solares de baixo custo (CSBC), por meio do uso de materiais recicláveis visando analisar o desempenho de cada configuração proposta no aquecimento de água para uso residencial.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos nesse trabalho, foi conduzida uma análise experimental nos meses de maio a setembro de 2012.

O experimento foi instalado no Laboratório de Hidráulica, do Curso de Tecnologia em Saneamento Ambiental, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Campus Pelotas, definido pelas suas coordenadas geográficas: 31°46'00.96" de latitude sul e 52° 21' 12,2" de longitude oeste. O clima da região, segundo a classificação do IBGE (2010), é temperado úmido.

A análise experimental baseou-se na montagem de seis modelos de coletores solares de baixo custo.

Um dos modelos de CSBC foi confeccionado utilizando duas tubulações de PVC de 20 mm de diâmetro e 1,04 m de comprimento, sendo cada uma, pintada

R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 6, n. 1, p. 41 - 66, abr./set. 2017.

com tinta preta fosca. Foram utilizados tubos e conexões hidráulicas de PVC rígido no diâmetro de 20 mm. Este coletor foi denominado de Coletor A.

Outro modelo de CSBC foi confeccionado com 12 garrafas PET e duas tubulações de PVC de 20 mm de diâmetro e 1,04 m de comprimento cada. As tubulações de PVC foram pintadas com tinta preta fosca. Foram utilizados tubos e conexões hidráulicas de PVC rígido no diâmetro de 20 mm. Este coletor foi denominado Coletor B.

Utilizando 12 garrafas PET, 10 embalagens cartonadas do tipo longa vida e duas tubulações de PVC de 20 mm de diâmetro e 1,04 m de comprimento cada, foi construído o modelo de CSBC intitulado Coletor C. As tubulações de PVC e as embalagens cartonadas do tipo longa vida foram pintadas com tinta preta fosca. Também foram utilizados tubos e conexões hidráulicas de PVC rígido no diâmetro de 20 mm. Este coletor foi confeccionado baseando-se na metodologia descrita por Alano (2008).

Fundamentando-se no sistema de aquecimento solar alternativo de baixo custo proposto por Lopo (2010) e aplicando-se algumas modificações, foi construído um modelo de CSBC utilizando-se 12 garrafas PET, duas tubulações de PVC de 20 mm de diâmetro e 1,04 m de comprimento e 10 latas de alumínio. Foram pintadas com tinta preta fosca as tubulações de PVC e foram utilizados tubos e conexões hidráulicas de PVC rígido no diâmetro de 20 mm. Este modelo de CSBC foi denominado Coletor D.

Empregando duas tubulações de PVC de 20 mm de diâmetro e 1,04 m de comprimento cada, 12 garrafas PET, 10 embalagens cartonadas do tipo longa vida e revestimento de poliuretano, foi construído o CSBC denominado Coletor E. As tubulações de PVC e as embalagens cartonadas do tipo longa vida foram pintadas com tinta preta fosca. Foram utilizados tubos e conexões hidráulicas de PVC rígido no diâmetro de 20 mm.

Constituído por uma placa de perfil plano (duplo) de PVC rígido extrudado de cor branca, nas dimensões de 1,025 m de comprimento, 0,21 m de largura e 8,0 mm de espessura, foi construído o CSBC denominado Coletor F. Os tubos de PVC foram cortados, fresados e colados às placas de PVC por meio de adesivo plástico. Foram utilizados tubos e conexões hidráulicas de PVC rígido no diâmetro de 25 mm. A placa coletora foi pintada com esmalte sintético preto fosco, a fim de se obter uma melhor absorção da radiação solar global incidente.

R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 6, n. 1, p. 41 - 66, abr./set. 2017.

A construção do Coletor F foi baseada na metodologia desenvolvida pela Sociedade do Sol. (SOSOL, 2009)

Após a construção de todos os modelos de coletores solares, foi realizado um teste de vazamentos nas condições de trabalho.

Os coletores foram instalados voltados para a orientação norte (hemisfério Sul) e inclinados em relação à horizontal em 30° segundo critérios adotados por SOSOL (2009), para que se obtivesse a maior quantidade possível de energia solar. Os coletores foram apoiados em uma estrutura de madeira e cada coletor foi alimentado por um reservatório de PVC de 20 litros, sem revestimento térmico, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Instalação e disposição dos coletores solares de baixo custo, da esquerda para direita: coletor F, coletor D, coletor E, coletor B, Coletor A e Coletor C. (Pelotas, RS 2012).



Para o monitoramento da temperatura da água foi utilizado um sensor conectado a um termômetro digital, de máxima e mínima, HT – 210 da marca Instrutherm. As leituras da temperatura foram realizadas diariamente nos dias úteis no horário das 14 h, horário que o coletor atinge o maior gradiente de temperatura, como mencionado por Pereira et al. (2000).

Para analisar o comportamento térmico dos coletores ao longo do dia, foram instalados na saída de água quente de cada coletor, sensores do tipo termopar, modelo K, formado por fios de Chromel, como termoelemento positivo, e Alumel, como termoelemento negativo, com sensibilidade de aproximadamente $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ e faixa de leitura de $-200\text{ }^\circ\text{C}$ até $1260\text{ }^\circ\text{C}$.

Os termopares foram conectados a um termômetro digital datalogger, modelo TD-880, marca ICEL. As temperaturas foram programadas de 30 em 30 min.

Os dados referentes à radiação solar horária mensal foram obtidos através da Estação Meteorológica Automática Davis, situada na Sede da Embrapa Clima Temperado – Pelotas - RS, definida pelas suas coordenadas geográficas: latitude 31° 42' S, longitude 52° 24' O. Estes dados também podem ser obtidos através do Boletim Climatológico Mensal, disponível no site do laboratório.

Para análise dos dados experimentais foi utilizado o software Assistat (Assistência Estatística). (SILVA; AZEVEDO, 2002).

Foi aplicado o teste de média de Tukey para comparar médias mensais de temperatura do ar e da água aquecida nos modelos de coletores solares de baixo custo estudados no experimento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Não foram encontradas dificuldades na obtenção dos materiais necessários para a confecção dos coletores, pois os materiais foram obtidos facilmente em unidades recicladoras do município de Pelotas, RS.

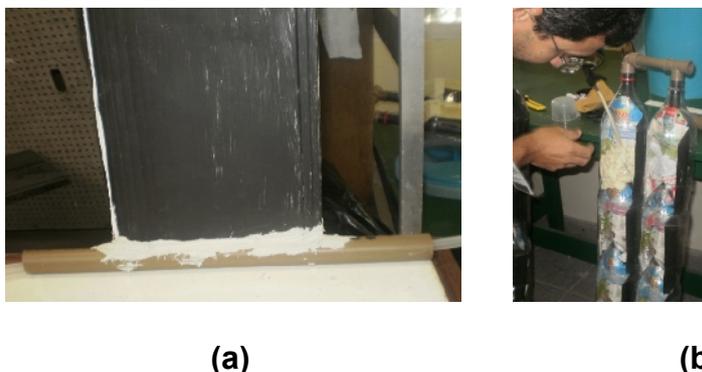
A construção do coletor A e do coletor B foi relativamente simples, pois esses modelos de CSBC utilizam apenas canos de PVC pintados de preto fosco (Coletor A), e no caso do coletor B, canos de PVC pintados de preto fosco com o acréscimo de garrafas PET. Em relação ao tempo necessário para a montagem, comparando estes dois coletores, o coletor B despendeu um maior tempo para sua confecção, pois foi necessário realizar cortes nas garrafas PET.

O coletor C apresentou, em relação ao coletor B, o acréscimo de embalagens cartonadas do tipo longa vida, que fez com que o tempo necessário para sua montagem aumentasse, pois foi necessário dobrar e pintar cada embalagem, além de cortar cada garrafa PET.

Já o coletor D apresentou em sua composição, em relação ao coletor C, a substituição das embalagens longa vida por latas de alumínio, o que fez com que o tempo empregado na construção de ambos os coletores fosse praticamente equivalente, pois no coletor D tiveram de ser feitos cortes nas latas de alumínio.

As principais dificuldades foram observadas no coletor E e no Coletor F. Os detalhes construtivos destes coletores podem ser observados na figura 2.

Figura 2 – Detalhe da união da placa de PVC com o cano de PVC 25 mm (a), e injeção do poliuretano nas garrafas PET (b). Coletores F e E, respectivamente.



O coletor F apresentou dificuldades na sua construção em relação à obtenção dos materiais utilizados por Sosol (2009), como os painéis e adesivo epóxi, sendo necessário realizar modificações na metodologia proposta. Essas dificuldades foram observadas também por Silva & Sá (2009).

Foram adquiridos forros de PVC em dimensões menores (1,00 x 0,2m), sendo necessário realizar rasgos longitudinais no tubo de PVC para obtenção das dimensões propostas. Essa metodologia ocasionou maior ocorrência de vazamentos nas laterais e na união da placa de PVC com o cano de PVC de 25 mm.

No coletor E também foram observados problemas de montagem em relação à aplicação de poliuretano, devido ao fato do material ser expansível, e de não possuir dados na bibliografia referentes à quantidade de material necessário para a sua construção.

Após a construção e instalação dos coletores, foram feitas anotações referentes à área, volume e preço de cada coletor, como apresentado na tabela 1.

Tabela 1 – Preço total dos coletores por metro quadrado (valores obtidos em lojas especializadas de material de construção) Pelotas, RS (2012).

Coletor	Área (m ²)	Volume (L)	Custo total (R\$/m ²)
A	0,20	0,50	44,95
B	0,20	0,50	44,95
C	0,20	0,50	66,20
D	0,20	0,50	44,95
E	0,20	0,50	158,80
F	0,22	1,50	207,30

Fonte: Embrapa Pelotas/RS (2012)

Os coletores A, B e D apresentaram os menores custos de construção, custando R\$44,95/m², contra R\$66,20/m² do coletor C, R\$158,80/m² do coletor E e R\$207,30 do coletor F, que foi o mais dispendioso. Ou seja, os coletores C, E e F, são respectivamente, 47,3%, 253,3% e 361,2% mais caros que os coletores A, B e D.

O coletor E apresentou alto custo de montagem em relação às demais configurações, devido à utilização do Poliuretano. Porém, o coletor F apresentou vazamentos, sendo necessário o uso de maior volume de adesivo plástico, que é utilizado para sua vedação, elevando o seu custo final.

O custo de fabricação do coletor de placas de PVC estudado por Reis (2009) foi de R\$75,00/m², sendo que os principais materiais utilizados na sua confecção foram: placa alveolar de forro de PVC, latas de alumínio, tubos de PVC, joelhos de PVC e cola PVC.

O coletor solar estudado por Lopo (2010) teve um custo de fabricação de R\$77,00. Os principais materiais utilizados na sua fabricação foram: tubos de PVC, latas de alumínio de material reciclado, tês e cola de PVC.

Observou-se que no coletor F, o custo está relacionado principalmente ao preço da cola utilizada e a habilidade do montador no uso desse material.

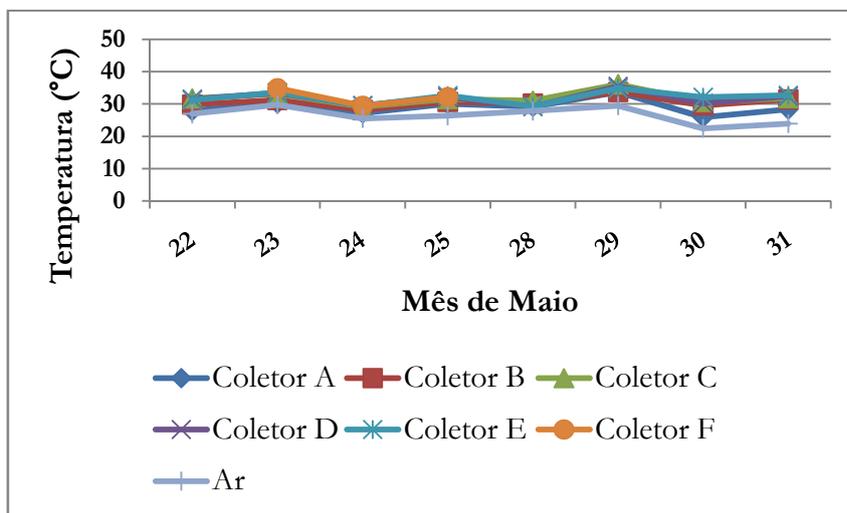
Em relação ao volume, o coletor F possui maior área e maior capacidade de armazenar água, possuindo o triplo de volume em relação às demais configurações, devido ao fato da placa de PVC utilizada ser alveolar, possuindo um maior volume de água circulante.

No período em que foi realizado o monitoramento da temperatura nos coletores, observou-se através dos dados obtidos, um comportamento

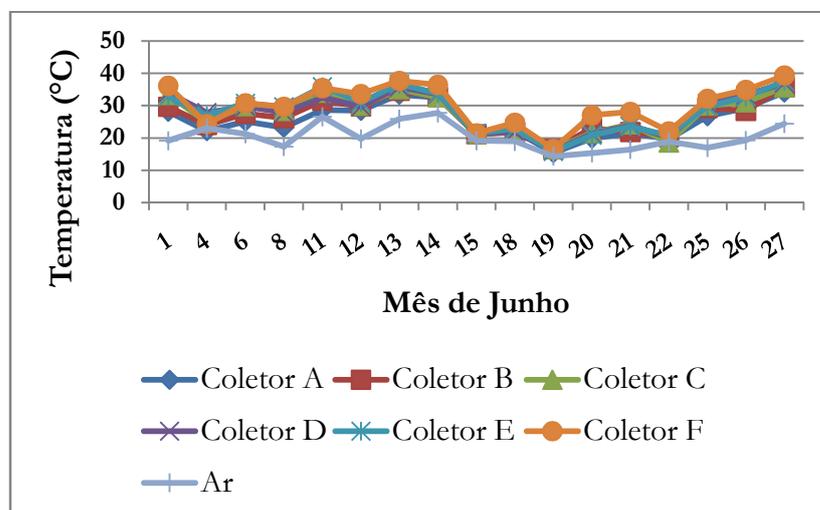
R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 6, n. 1, p. 41 - 66, abr./set. 2017.

semelhante entre eles e em relação à temperatura ambiente nos meses de maio, junho, julho, agosto e setembro (Figura 3).

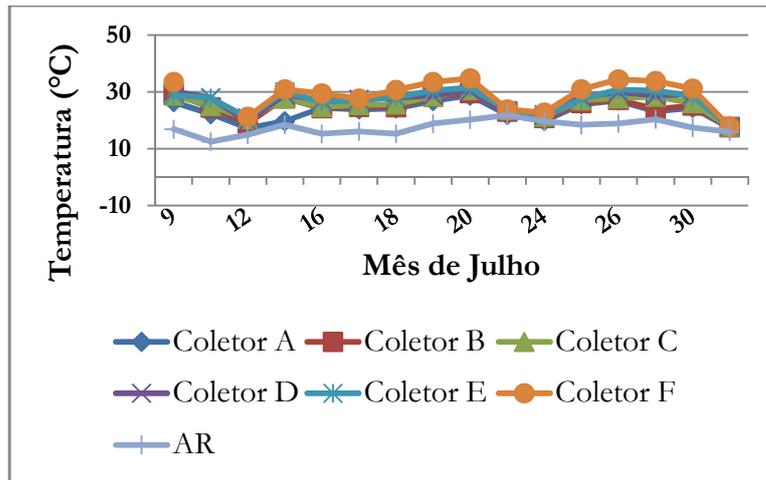
Figura 3 – Temperatura máxima da água no interior dos coletores e temperatura máxima do ar, nos meses de: (a) maio, (b) junho, (c) julho, (d) agosto e (e) setembro.



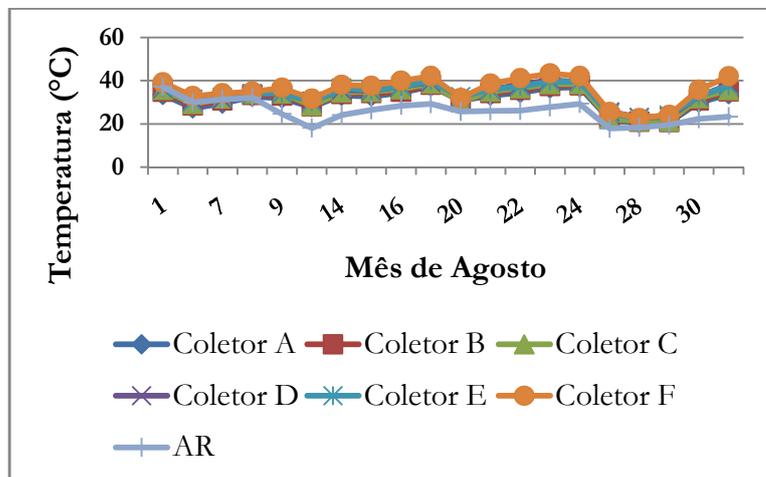
(a)



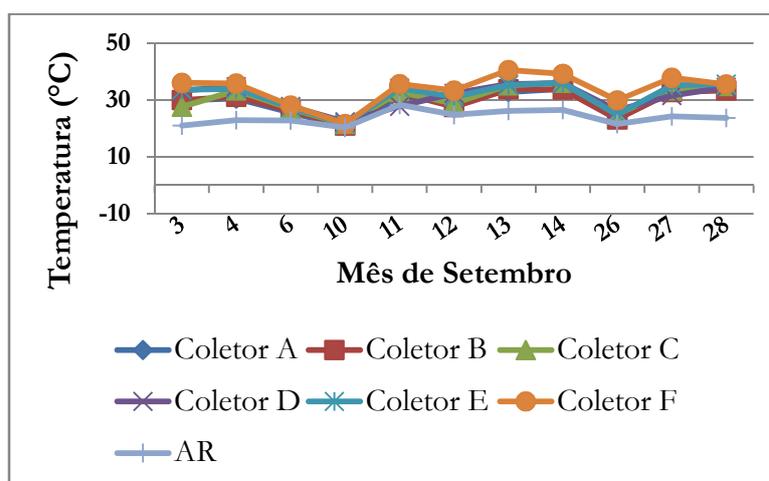
(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Embrapa Pelotas/RS (2012)

R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 6, n. 1, p. 41 - 66, abr./set. 2017.

A temperatura medida nos coletores foi superior à temperatura ambiente no período analisado. Este mesmo comportamento foi verificado por Pereira et. al. (2000), que encontrou o valor de 38,5°C no coletor solar alternativo por ele estudado. Esta temperatura foi encontrada no horário das 14 h, período em que a temperatura ambiente encontrada foi de 26°C, obtendo-se um gradiente de temperatura de 12,5°C.

O Coletor F apresentou as maiores temperaturas e, conseqüentemente, obteve os maiores gradientes de temperatura ao longo dos meses, em relação às demais configurações. Entretanto, as menores temperaturas foram medidas no reservatório acoplado ao coletor A. Porém os valores observados foram superiores à temperatura ambiente, indicando o ganho de temperatura neste coletor. Os gradientes médios de temperatura para cada mês, obtidos em cada coletor, podem ser visualizados na tabela 2.

Tabela 2 – Gradientes médios de temperatura nos coletores solares, nos meses de maio a setembro, no horário das 14 h (temperatura máxima).

Meses	Coletor A	Coletor B	Coletor C	Coletor D	Coletor E	Coletor F
Maio	2,5	4,1	5,4	5,2	5,5	4,9
Junho	5,1	6,5	7,3	7,8	8,1	9,8
Julho	5,7	7,2	8,0	9,2	9,4	11,2
Agosto	5,0	5,9	6,6	7,9	7,8	9,9
Setembro	5,3	5,7	6,6	7,3	7,8	10,1

Fonte: Embrapa Pelotas/RS (2012)

O maior gradiente de temperatura foi observado no coletor F no mês de Julho, quando se observou um gradiente de 11,2 neste coletor. Este gradiente foi inferior ao observado no coletor solar proposto por Pereira et. al. (2000), que apresentou gradiente máximo de 12,5°C, por volta das 14 h.

Devem ser levados em consideração vários fatores para justificar essa diferença encontrada, como a temperatura ambiente, que no experimento de Pereira et. al. (2000), era de 26°C, contra 17,5°C no presente estudo. Outro fator importante a ser levado em consideração é a diferença na composição dos sistemas de aquecimento solar em questão. O sistema proposto por Pereira et. al. (2000), apresenta os seguintes materiais reaproveitáveis: cobertura de vidro, caixa de madeira isolada termicamente, placa de fórmica, tubos de plástico e superfície trocadora de calor confeccionada com latas de alumínio pintadas de preto na superfície externa, além de revestimento de lã de vidro para isolamento térmico do reservatório utilizado.

As temperaturas mais elevadas também se devem ao fato do coletor que apresenta cobertura de vidro, ser favorecido pelo denominado “efeito estufa”, no qual a radiação incidente na superfície negra do coletor fica confinada no seu interior, sendo absorvida e emitida pela superfície negra, conforme ilustrado por Pereira et. al. (2000).

No mês de maio, início do monitoramento da temperatura durante o experimento, o coletor F iniciou o mês apresentando maior temperatura, porém, ocorreram alguns vazamentos, fazendo com que este coletor fosse retirado do experimento para consertos.

Neste mesmo mês, conforme apresentado na figura 3 (a), os coletores apresentaram a maior temperatura máxima no dia 29, dia em que a temperatura máxima do ar foi de 29,4°C.

As temperaturas máximas dos coletores no dia 29 foram de: 33,7°C nos coletores A e B; 36°C no coletor C; 35,4°C no coletor D; 34,8°C no coletor E. A temperatura do coletor F não foi aferida neste dia.

Portanto o coletor C se destacou, sendo o que apresentou temperatura mais elevada. No período em que o coletor F estava em funcionamento, ele apresentou a maior temperatura máxima no dia 23, de 34,8°C, mesmo dia em que observou-se a maior temperatura máxima do ar, de 29,7°C.

Com o coletor F já consertado, no mês de Junho, seguiram-se as análises de temperatura, onde se seguiram as mesmas tendências de aquecimento para todos os coletores, destacando-se o aquecimento do coletor F, que foi superior ao apresentado nas demais configurações, apresentando temperatura máxima de 39,3°C no dia 27, mesmo dia em que todos os coletores apresentaram as maiores temperaturas do período, sendo obtidos: 34,1°C no coletor A; 35,7°C no coletor B; 35,6°C no coletor C; 37°C no coletor D e 37,5°C no coletor E. A temperatura máxima ambiente neste período foi de 24,4°C.

Houve uma queda na temperatura do ar no mês de julho em relação aos meses anteriores. No dia 23 a temperatura máxima do ar foi de 21,8°C, sendo a maior temperatura registrada no período das análises deste mês.

Os coletores obtiveram as maiores temperaturas no dia 20 de Julho, obtendo-se: 28,7°C no coletor A; 29,6°C no coletor B; 30,7°C no coletor C; 30,4°C no coletor D e 31,6°C no coletor E. A maior temperatura máxima foi de 34,7°C obtida pelo coletor F.

Em agosto, as temperaturas nos coletores aumentaram e mantiveram o comportamento observado nos meses anteriores, com a maior temperatura máxima sendo observada no coletor F e a menor, no coletor A.(Figura 3 d)

Os coletores A, B, C e E atingiram suas maiores temperaturas máximas no dia 17, sendo respectivamente, 37,3°C; 38°C; 38,7°C e 39,9°C. Já os modelos D e F atingiram suas maiores temperaturas máximas no dia 23, sendo 40,2°C e 43,3°C, respectivamente, para uma temperatura do ar de 27,7°C.

No dia 14 do mês de setembro os coletores A, C, D e E atingiram as temperaturas de 33,9°C; 36 °C; 35,9°C e 36°C, respectivamente, sendo as maiores atingidas pelos mesmos neste período, para uma temperatura do ar de 26,5°C.

Já os coletores B e F, atingiram respectivamente as temperaturas de 33,8°C e 40,5°C no dia 13, quando se observou a temperatura do ar de 26,2°C.

Comparando a temperatura da água nos reservatórios e temperatura média do ar, observou-se que todos os coletores promoveram um aquecimento da água nos meses de maio, junho, julho, agosto e setembro, como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Temperatura média mensal do ar e da água aquecida em modelos de coletores solares de baixo custo

Modelos de Coletores	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro
A	29,0 ab	25,3 ab	23,3 b	30,8 ab	29,4 ab
B	30,6 a	26,7 a	24,8 b	31,8 a	29,6 ab
C	31,9 a	27,5 a	25,5 ab	32,4 a	30,5 a
D	31,7 a	28,0 a	26,7 ab	33,8 a	31,1 a
E	32,0 a	28,4 a	27,0 ab	33,7 a	31,7 a
F	32,1 a	30,0 a	29,1 a	35,7 a	33,9 a
AR	26,5 b	20,2 b	17,6 c	25,8 b	23,9 b

Fonte: Embrapa Pelotas/RS (2012)

** As médias de cada mês, seguidas pela mesma letra, não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.*

No mês de maio, observou-se que os modelos de coletores promoveram um aumento na temperatura da água, diferindo estatisticamente pelo teste de Tukey, exceto o coletor constituído somente por tubos de PVC pintados de preto (coletor A). Esse resultado foi verificado também nos meses de junho e agosto, como apresentado na tabela 3. Já no mês de setembro, os coletores diferiram estatisticamente pelo teste de Tukey, exceto pelos coletores A e B.

Em maio o acréscimo de temperatura obtido pelo uso dos coletores solares foi superior a 5°C, sendo que o maior ganho de temperatura, de 11,5°C foi obtido no mês de julho.

Em junho, período caracterizado por baixa incidência de radiação solar (Llopart et. al. 2005), os coletores propiciaram um aumento de temperatura significativamente superior ao observado em relação à temperatura do ar.

O mês de julho foi caracterizado pela menor temperatura do ar, porém todos os modelos de coletores aqueceram a água a temperaturas significativas, diferindo estatisticamente da temperatura média do ar, no período analisado. O coletor F se destacou positivamente apresentando um melhor desempenho no aquecimento de água, seguido pelos coletores E, D e C.

Como mencionado por Reis (2009), que analisou o desempenho de um coletor com superfície absorvedora em chapas de forro de PVC, semelhante ao proposto no presente estudo, uma das razões que faz com que este coletor apresente melhor eficiência é o fato da área de exposição à radiação solar ser igual à área de absorção da mesma, neste coletor.

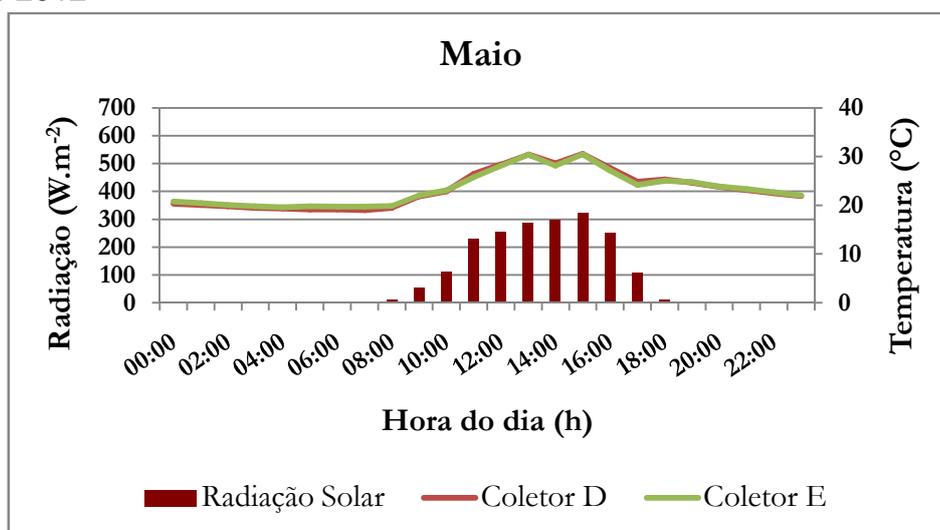
Os coletores que possuem cobertura transparente são favorecidos pelo efeito estufa, que impede a perda de calor para o meio, como mencionado por Reis (2009). Este fato ocorre nos coletores que possuem garrafas PET envolvendo suas tubulações, como é o caso dos coletores B, C, D e E que apresentaram um melhor desempenho em relação ao coletor A, que não apresenta tal revestimento.

Foram realizadas comparações entre quatro modelos: C, D, E e F, aos pares, para analisar o comportamento térmico diário dos coletores.

Para isso foram aferidas diariamente as temperaturas, de 30 em 30 minutos, no interior de cada reservatório, no período de cinco dias, utilizando termopares conectados a um termômetro digital.

No mês de Maio de 2012, foi feito o monitoramento da temperatura da água nos coletores D e E, a fim de obter-se uma comparação do comportamento térmico entre eles, os resultados obtidos podem ser visualizados na figura 4.

Figura 4 – Temperatura média horária obtida nos coletores solares em função da radiação solar média horária incidente em Pelotas/RS entre os dias 25 a 29 de Maio de 2012



Fonte: Embrapa Clima Temperado (Dados obtidos através da estação automática Davis, situada na Sede da Embrapa Clima Temperado). Pelotas/RS (2012)

No período analisado, os dois tipos de coletores apresentaram comportamento térmico semelhante, no que diz respeito à variação de temperatura obtida em ambos protótipos e a diferença de temperatura obtida nos coletores não foi relevante.

A temperatura da água nos coletores encontrava-se, no início do dia, em equilíbrio com a temperatura ambiente, devido à baixa intensidade de radiação solar, que foi aumentando durante o dia, propiciando um aumento gradativo na temperatura da água no interior dos coletores, variando de acordo com fatores como nebulosidade e incidência de radiação solar global, resultados semelhantes foram observados por Pereira et. al. (2000) e Nagaoka et. al. (2005).

Verificou-se que a variação de temperatura no interior dos reservatórios foi proporcional à quantidade de radiação solar incidente registrada no período da análise. Esse mesmo comportamento foi observado no estudo realizado por Mendes & Vieira (2009).

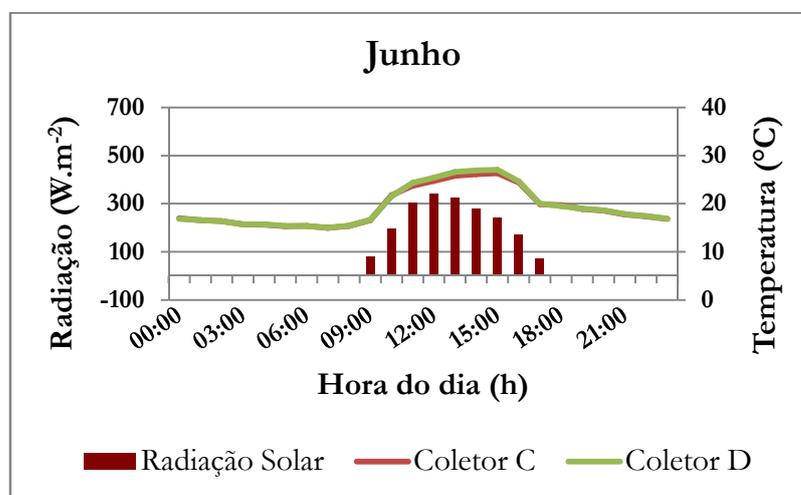
Os coletores obtiveram as maiores médias de temperatura no horário das 15 h, sendo que o coletor D atingiu a temperatura média de 30,56°C e o coletor E atingiu a temperatura média de 30,46°C, neste horário também ocorreu a maior média de radiação solar, que foi de 322,2 W.m⁻².

Em relação aos níveis médios de temperatura exigidos para o banho, que se situam entre 34°C e 36°C (REIS, 2009; LOPO, 2010), os níveis atingidos por ambos coletores ficaram abaixo do mínimo exigido.

Lopo (2010) estudou duas configurações de coletores: uma com aletas de alumínio sem EPS (poliestireno expandido) e outra com aletas de alumínio mais EPS. O autor observou que a influência da introdução das aletas sobre o desempenho do coletor foi menor do que a colocação da grade absorvedora sobre placas de EPS. A configuração sem aletas com EPS obteve um rendimento de 21,4% e variação de temperatura de 9,8°C contra 18,6% de rendimento e 9,2°C de variação de temperatura para a configuração com aletas e sem EPS.

No mês de Junho foi realizada a comparação dos coletores C e D. Na Figura 5 são representados graficamente os valores de temperatura da água de reservatórios acoplados nos coletores em função da radiação.

Figura 5 – Temperatura média horária obtida nos coletores solares em função da radiação solar média horária incidente em Pelotas/RS entre os dias 12 a 16 de Junho de 2012



Fonte: Embrapa Clima Temperado (Dados obtidos através da estação automática Davis, situada na Sede da Embrapa Clima Temperado). Pelotas, 2012.

A radiação solar incidiu sobre os coletores a partir das 10h, ocasionando o aquecimento da água nos coletores. Essa tendência de aumento da temperatura nos coletores se manteve proporcional à radiação que incidiu sobre eles ao longo do dia, sendo que a partir das 17h observou-se um declínio na temperatura da água nos reservatórios em resposta à redução da radiação solar incidente.

As médias de temperatura representadas na figura 5 demonstram que o coletor D, obteve melhores resultados de aquecimento de água, no decorrer do período analisado.

A maior média de radiação verificada foi de 340,2 w/m² às 12 h, as 15 h obteve-se a maior média de temperaturas, sendo 26,3°C para o Coletor C e 27°C para o Coletor D, quando a radiação solar já havia diminuído um pouco, passando para o valor de 243,6 w/m².

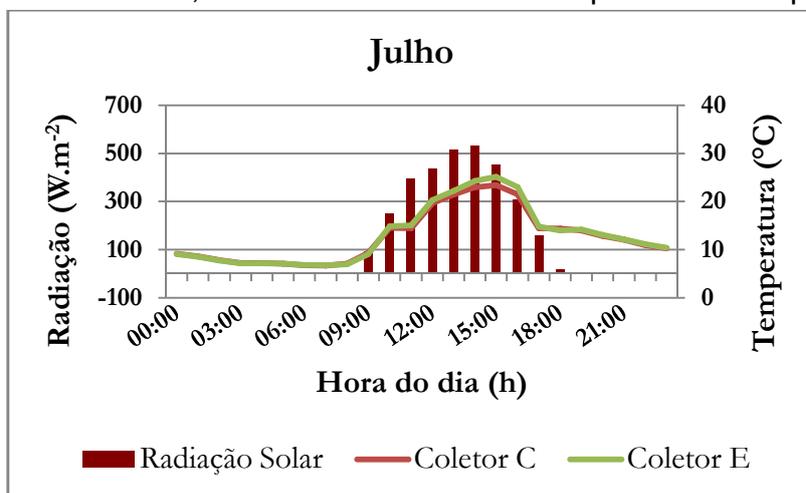
Percebe-se que a resposta dos coletores à radiação não foi imediata, levando cerca de três horas para os coletores atingirem valores máximos de temperatura após serem expostos ao maior nível de radiação solar.

Uma das configurações de coletor solar estudadas por Lopo (2010), utilizando latas de alumínio em sua composição, obteve valores médios de temperatura de 40,7°C na saída do coletor quando se observou a radiação solar média de 836 w/m².

Percebe-se que a temperatura do coletor estudado por Lopo (2010) foi mais elevada em comparação com a obtida neste experimento. Isso se deve à vários fatores, entre eles, o fato da radiação incidente no experimento de Lopo (2010) ter sido bem superior à verificada neste estudo.

No período de 12 a 16 de Julho de 2012, foram monitoradas as temperaturas obtidas na saída de água quente dos coletores C e E, obtendo-se as médias de temperaturas que estão apresentadas na figura 6.

Figura 6 – Temperatura média horária obtida nos coletores solares em função da radiação solar média horária incidente em Pelotas/RS entre os dias 12 a 16 de Julho de 2012 – Fonte: Embrapa Clima Temperado (Dados obtidos através da estação automática Davis, situada na Sede da Embrapa Clima Temperado).



Fonte: Embrapa Pelotas/RS (2012)

Apesar da radiação solar incidente nos coletores neste período ter sido mais alta em relação aos meses anteriores, chegando à média máxima de 532 W/m², os coletores apresentaram temperaturas baixas no aquecimento da água, chegando-se às médias máximas de 23,4°C no coletor C e 25,2°C no coletor E. Este fato deve às temperaturas baixas do ar observadas ao longo deste mês, que é caracterizado por ser um mês frio.

Da Palma e Rosado (2011) analisaram o desempenho térmico de um coletor solar construído com materiais recicláveis e baseado na metodologia proposta por Alano (2009), ou seja, similar ao coletor C em estudo nesse trabalho. Em um dos ensaios realizados, o coletor solar obteve a temperatura de 30,5°C

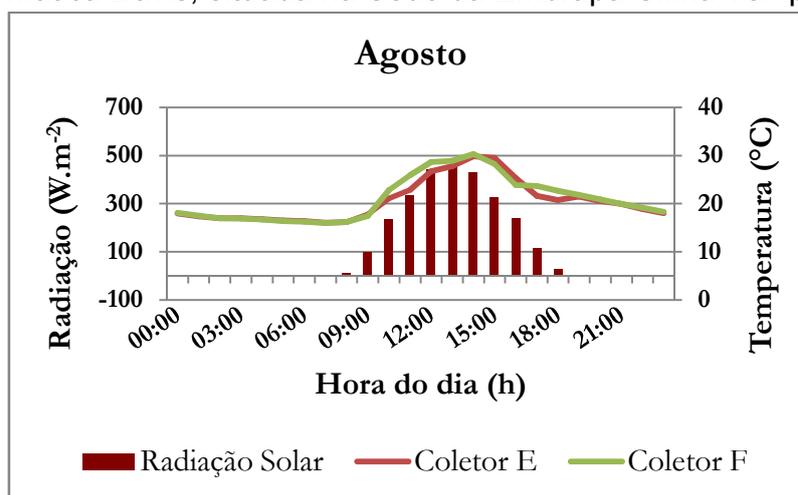
por volta das 12 h quando o tempo estava nublado e a temperatura ambiente era de 20°C.

O coletor E apresentou aquecimento superior ao do coletor C, este fato ocorreu, pois o coletor E apresenta além do revestimento térmico com garrafas PET, apresenta revestimento com Poliuretano, que aumenta à sua capacidade de armazenar energia térmica.

Coletores que apresentam revestimento obtém melhor desempenho como observado por Lopo (2010).

No mês de agosto de 2012, monitorou-se a temperatura dos coletores E e F, os resultados obtidos podem ser observados na figura 7.

Figura 7 – Temperatura média horária obtida nos coletores solares em função da radiação solar média horária incidente em Pelotas/RS entre os dias 01 a 05 de Agosto de 2012 – Fonte: Embrapa Clima Temperado (Dados obtidos através da estação automática Davis, situada na Sede da Embrapa Clima Temperado).



Fonte: Embrapa Pelotas/RS (2012)

O coletor F respondeu melhor à radiação solar, aquecendo mais rapidamente a água e alcançando valores de temperatura superiores aos observados no coletor E. Isso ocorre devido ao maior volume de água que o coletor F armazena e à sua área absorvedora preta ser maior.

A partir das 8h iniciou-se a incidência de radiação sobre os coletores, fazendo com que em 6h de incidência dos raios solares, os coletores elevassem suas temperaturas de 16,2°C (em ambos) para 29,8°C no coletor E e 30,3°C no coletor F, às 14 h.

No monitoramento de temperaturas realizado por Mendes & Vieira (2009), o tempo levado para elevar a temperatura média da água da temperatura ambiente para a temperatura máxima foi de aproximadamente 7 h.

O coletor E demora mais para aquecer, mas mantém a temperatura mais elevada da água nos horários de maior insolação, pois apresenta revestimento de poliuretano, que possibilita que este coletor armazene a sua temperatura quente sem que perca sua temperatura para o meio externo.

Ambos os coletores proporcionaram uma temperatura da água superior à temperatura ambiente, principalmente quando se observou a maior incidência da radiação solar.

4 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que os coletores demonstraram ser eficientes no aquecimento de água, pois a temperatura média dos mesmos manteve-se acima da temperatura do ar. O coletor F proporcionou um aumento significativo na temperatura da água em relação às demais configurações, porém este apresentou maiores dificuldades em relação à montagem e vedação e maior custo de construção em relação aos demais coletores.

O coletor A apresentou maior viabilidade técnica de construção, pois sua montagem mostrou-se relativamente fácil, porém, esse modelo não apresentou um aquecimento de água significativo, em relação à temperatura ambiente.

O coletor B, que difere do coletor A, apenas por possuir revestimento com garrafas PET, apresentou temperaturas mais elevadas que o coletor A, isto porque as garrafas PET, que envolvem os canos por onde passa a água, protegem o coletor contra as intempéries e mantêm o calor através de efeito estufa.

A inserção de materiais como: garrafas PET, latas de alumínio, embalagens de longa vida e espuma de poliuretano proporcionam uma melhor eficiência do coletor e conseqüentemente um incremento da temperatura da água.

Para a utilização de sistemas de aquecimento solar visando a redução do consumo de energia elétrica em residências devem ser realizados

aprimoramentos nos coletores e reservatórios, com o intuito de manutenção da temperatura da água, principalmente em períodos de inverno na sul do Brasil.

THERMAL EFFICIENCY OF MATERIALS RECYCLABLES IN WATER HEATING THROUGH SOLAR ENERGY

ABSTRACT

It has been noticed a growing concern in seeking renewable energy sources that aim at increasing the supply of energy to the economical and sustainable development. Brazil has significant potential for solar energy utilization due to high radiation incident on the country. The global solar irradiation values in Brazil are higher than in most European countries, where there are numerous projects for use of solar energy spread, some made with government incentives. The objective of this study was to evaluate the composition of low-cost solar collectors (LCSC), through the use of recyclable materials in order to analyze the performance of each proposed configuration on the heating of water for residential use. Six models of LCSC were designed and the temperature of each hot water tank outlet was measured. The analyzed models showed similar thermal behavior and the average temperature inside the reservoirs (tanks) was significant higher than the average temperature of the environment. The highest rate of water heating was found in the collector built with PVC plates (Collector F), and the lowest one was found in the collector built with PVC pipes colored in black (Collector A).

Key words: Reuse. Energy. Low cost.

REFERÊNCIAS

ALANO, J. A. **Manual sobre a construção e instalação do aquecedor solar com descartáveis.** Disponível em <<http://www.ecodesenvolvimento.org/biblioteca/guiasefolhetos/manual-do-aquecedor-solar-de-jose-alano>> Acesso em: 26 jan.2013.

ALTOÉ, L.; FILHO, D. O. ; CARLO, J. C. **Análise energética de sistemas solares térmicos para diferentes demandas de água em uma residência unifamiliar.** Ambiente construído, Porto Alegre, v.12, n.3, set. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212012000300006&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 19 jun. 2013.

BORTOLETTO, D. R.; PEZZUTO, C. C. **Análise de desempenho de um aquecedor solar de baixo custo: reservatório térmico alternativo**. In: XVII Encontro de Iniciação Científica – ISSN 1982-0178 e II Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação – ISSN 2237-0420, PUC-Campinas, Campinas, SP, 2012. Disponível em: <https://www.puc-campinas.edu.br/websist/porta/pesquisa/ic/pic2012it/resumos/2012824_102849_965912203_reslau.pdf> Acesso em: 26 maio 2013.

COIMBRA, N.; AZAMBUJA, C.; DALMAS, T.; COELHO, L. **Eficiência Térmica de Coletor Solar de Baixo Custo**. Relatório de Trabalho de Conclusão, disciplina de Medições Térmicas – ENG03108 – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<http://143.54.70.55/medterm/20081/coletor%20solar%20baixo%20custo.pdf>> Acesso em: 19 jun. 2013.

LLOPART, M. P.; BOIASKI, N. T.; SARAIVA I. ; SILVA, J. B. **Radiação solar em Pelotas, RS: análise estatística da média mensal**. In: XIV Congresso de iniciação científica, Universidade Federal de Pelotas, 2005. Disponível em: <www.ufpel.edu.br/cic/2005/arquivos/CE_01201.rtf>. Acesso em: 15 jun.2013.

LOPO, A. B. **Análise do desempenho térmico de um sistema de aquecimento solar de baixo custo**. Tese (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. Disponível em: <ftp://ftp.ufm.br/pub/biblioteca/ext/bdtd/AlexandreBL_DISSERT.pdf> Acesso em: 20 jun. 2013.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. **Enhancing Information For Solar and Wind Energy Technology Deployment in Brazil**. Energy Policy, v. 39, n. 7, p. 4378-4390, 2011.

MENDES, A. C. F.; VIEIRA, L. G. M. **Comparação de Desempenho entre um Aquecedor Solar de Baixo Custo (ASBC) e seu Similar Convencional**. In: VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica (COBEQ-IC), Uberlândia, MG, 2009. Disponível em: <<http://www.cobeqic2009.feq.ufu.br/uploads/media/100921251.pdf>> Acesso em: 29 maio 2013.

NAGAOKA, A. K; SAMPAIO, C. A de PAIVA; BOFF, C. E; ARALDI, A. A. R. **Desenvolvimento de um Coletor Solar Utilizando Reciclagem de Lâmpadas Fluorescentes**. Revista de Ciências Agroveterinárias, Lages, v.4, n.2, p. 120-125, 2005. Disponível em: <http://rca.cav.udesc.br/rca_2005_2/nagaoka.pdf> Acesso em: 17 jun. 2013.

PALMA, F. A.; ROSADO, V. O. G. **Aperfeiçoamento de um coletor solar construído com materiais recicláveis**. Revista Ciências Exatas – Universidade de Taubaté (UNITAU) – Brasil – vol. 17, n. 2, 2011. Disponível em: <<http://periodicos.unitau.br/ojs-2.2/index.php/exatas/article/viewFile/1552/1102>> Acesso em: 03 jun. 2013.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. Disponível em: <http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf> Acesso em: 03 jun. 2013

PEREIRA, R. G.; FREITAS, A. L. D. ; TORRES, C. S. ; COSTA, N. G. **Desenvolvimento de um coletor solar alternativo utilizando materiais reaproveitáveis**. Mundo & Vida, v.2, n.1, p. 57-60, 2000. Disponível em: <[http://www.uff.br/cienciaambiental/mv/mv1/MV1\(1-2\)57-60.pdf](http://www.uff.br/cienciaambiental/mv/mv1/MV1(1-2)57-60.pdf)> Acesso em: 20 jun. 2013.

REIS, E. P. **Análise do Desempenho Térmico de Um Sistema de Aquecimento Solar Utilizando Coletor Com Superfície Absorvedora Em Chapas de Forro de PVC**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Salvador, 2009. Disponível em: <<http://www.gemaa.ifba.edu.br/Dados/Disserta%C3%A7%C3%B5es/DISSERT A%C3%87%C3%83O%20FINAL%20-%20Edmilson.pdf>> Acesso em: 13 jun. 2013.

REIS, M. R. O. ; LEITE, A. A. F.; BARBOSA, T. N. **Modelo teórico de um coletor solar de placa plana mesclando materiais virgens com materiais reciclados (CSSR)**. In: XXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2011. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2011_TN_WIC_145_911_18235.pdf> Acesso em: 20 jun. 2013.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V.. **Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.4, n.1, p. 71-78, 2002. Disponível em: <<http://www.deag.ufcg.edu.br/rbpa/rev41/Art410.pdf>> Acesso em: 10 jun. 2013.

SILVA, W. S.; SÁ, J. S. **Viabilidade técnica do uso doméstico de coletores solar de baixo custo**. In: Livro de Resumos da 2ª Mostra de Trabalhos de Tecnologia Ambiental, Pelotas, RS, 2009. Disponível em: <<http://www2.pelotas.ifsul.edu.br/cstsa/mostra/PDF/Viabilidade%20Tecnica.pdf>> Acesso em: 16 jun. 2013.

SIQUEIRA, D. A. **Estudo de desempenho do aquecedor solar de baixo custo.** Dissertação de Mestrado, Uberlândia, FEQUI-UFU, 2009. <<http://penelope.dr.ufu.br/bitstream/123456789/566/1/EstudoDesempenhoAquecedor.pdf>> Acesso em: 25 maio 2013.

SOCIEDADE DO SOL (SOSOL). **Manual de manufatura e instalação experimental do - ASBC- Aquecedor solar de baixo custo.** Disponível em: <www.sociedadedosol.org.br> Acesso em: 26 jan. 2013.