

ANÁLISE TERMoeCONÔMICA DE COLETORES SOLARES PLANOS

André Luiz Barcellos Jr.

Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR/CCET, Laboratório de Sistemas Térmicos
Rua Imaculada Conceição, 1155, Curitiba – PR – 80215-901 – Brazil
argusaquecedores@uol.com.br

Filipe H. C. Medeiros

filipe.med@bol.com.br

Eduardo H. Notomi

notomi@netpar.com.br

Nathan Mendes

nmendes@ccet.pucpr.br

Luís Mauro Moura

lmoura@rla01.pucpr.br

Resumo: As fontes de energia convencionais ainda a disposição para o consumo, não por muitas vezes racional, vêm sofrendo indícios de extinção e paralelamente de desequilíbrios ecológicos, o que faz com que o custo unitário de sua utilização e as crises energéticas aumente substancialmente, tornando-se cada vez mais oneroso o uso de tais fontes. Entre todas as fontes de energias alternativas em uso atualmente, pode-se considerar a energia solar como uma das mais promissoras, sendo esta limpa, segura e gratuita, podendo ser destinada em diversos campos como: secadores, destiladores, geração de energia elétrica, aquecimento de água etc. Dessa forma, tendo como objetivo verificar o rendimento térmico em coletores solares planos para aquecimento de água e, visando-se a uma melhor razão custo-benefício, empregaram-se diferentes condições de operações e de materiais. O cumprimento do objetivo exigiu a montagem de bancada, com um modelo com características comerciais como referência e outros três módulos distintos, permitindo a comparação de resultados em termos de diferença de temperatura, fluxo de calor através da superfície de base do coletor e custos. Resultados mostraram que coletores sem cobertura podem prover uma melhor eficiência térmica a um custo reduzido.

Palavras-chave: coletores solares planos, análise termoeconômica, aquecimento solar

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios do ser humano é, sem dúvida, o abastecimento energético mundial, com o crescente consumo da energia convencional como os derivados de petróleo, energia elétrica, carvão dentre outros, tornando-se cada vez mais necessária a sua racionalização, evitando oscilações de preços e a escassez futura.

Entre todos os problemas enfrentados atualmente devido às crises energéticas provocadas pelo consumo desenfreado de energia, o homem vem procurando meios de supri-la a partir de fontes alternativas como a energia eólica e a energia solar, tendo esta seus efeitos térmicos aproveitados desde épocas imemoriais.

Uma das formas de aproveitamento da energia solar, é a sua utilização para aquecimento de água residencial, tendo em vista que este sistema já vem sendo utilizado no Brasil desde meados de 1970, quando um dos mais sérios problemas energéticos mundiais eclodiu, chamado de crise energética.

O sistema de aquecimento solar, com o objetivo de aquecer água, possui elevado custo de aquisição, mas, considerando que o Brasil é praticamente um país de clima tropical, torna-se viável o seu custo-benefício devido à longa vida útil do sistema. Desta forma, faz-se necessária a compreensão funcional do sistema, baseado em dados técnicos e experimentais, visando assegurar a demanda necessária a um dimensionamento eficiente.

Mveh et al. (1998) realizaram estudos de eficiência térmica em coletores solares sem cobertura para produção de água quente em locais onde a temperatura é baixa. Segundo os autores, nesse caso a eficiência é muito mais afetada pela temperatura ambiente e pela velocidade do vento.

Siqueira et al. (1998) desenvolveram uma correlação para a determinação da eficiência térmica diária em média mensal de um sistema de aquecimento solar de água operando em regime de termo-sifão. A equação obtida mostra que a eficiência é uma função linear das condições meteorológicas, da qualidade do coletor empregado e dos parâmetros de projeto que relacionam o volume do tanque, volume de demanda e área de coleta. Essa correlação é útil já que é uma alternativa simples e rápida para o cálculo da eficiência em média mensal sem a necessidade de se recorrer a determinação experimental ou a simulação computacional.

Estudos de campo também foram realizados por Neto (2000) que testou diferentes protótipos de coletores solares parabólicos para levantamento de curvas de eficiência térmica, constantes de tempo e eficiências óticas representadas pelos ângulos de incidência solar, na tentativa de otimizá-los. Gomes e Fico (2000) também realizaram estudos de otimização, mas com uma metodologia teórica do desempenho de coletores de placas. Eles introduziram um degrau no perfil da aleta para quatro materiais com diferentes espessuras de placas.

Mathiolaukis *et al.* (2001) estudaram o desempenho da circulação da água em coletores solares por termo-sifão através de uma simples simulação, comparando os dados experimentais com os simulados, podendo ser usado na otimização de projetos em desenvolvimentos futuros.

Eurides *et al.* (2002) verificaram os limites de aplicabilidade de coletores solares sem cobertura para o aquecimento de água doméstica. As simulações simplificadas do comportamento térmico mostraram que estes tipos de coletores podem ser uma ótima opção para aquecimento de água em lugares com temperaturas ambientes médias acima de 20°C, mas deve ser utilizado com cautela para lugares onde o inverno é mais rigoroso.

No entanto a eficiência dos coletores solares não é uma constante nem se limita a uma faixa estreita de valores como é a eficiência de muitos outros equipamentos utilizados em aquecimento. Depende fortemente dos valores das variáveis atmosféricas que estão sendo alteradas durante o dia todo e também da temperatura do fluido circulante. Deve-se levar em conta também os efeitos da tubulação e isolamento térmico, de sistemas de aquecimento auxiliar e da distribuição geométrica dos componentes. (Palz W., 1981).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi o de analisar termicamente coletores solares planos, a partir da utilização de sistemas em operação passiva ou termo-sifão (escoamento por convecção natural no circuito), sendo este o mais comum em países de clima tropical. A análise do sistema ficou a cargo do levantamento da diferença de temperatura entre a entrada e a saída de coletores e fluxo de calor através de suas superfícies inferiores, visando o melhor desempenho térmico com diferentes materiais de baixo custo e outros comumente utilizados em sua fabricação.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado na Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), a uma latitude de 25,4° Sul e com altitude média de 800 metros acima do nível do mar. O experimento foi montado no terraço do Bloco 2 do Parque Tecnológico, onde montaram-se duas bancadas de ensaios, sendo uma delas considerada como referência, possuindo um coletor solar plano interligado a um reservatório térmico, sendo este alimentado por uma caixa d'água formando assim o sistema por circulação natural de água através de forças de empuxo. Todo esse aparato foi conectado a um sistema de aquisição de dados Agilent 34970A.

2.1. Materiais e Métodos

A metodologia utilizada na análise de sistemas geradores de água quente, através da energia solar, foi vinculada à medição e análise de temperatura de entrada de água fria e saída de água quente dos coletores solares e reservatórios térmicos, variação de diferentes coberturas de superfície como vidros pontilhados e vidros lisos, chapa alveolar *Termoclear* de policarbonato e também a análise de coletores solares sem cobertura de superfície. Os coletores foram orientados para o norte com inclinação correspondente a latitude da cidade de Curitiba. Mediu-se também o fluxo de calor que atravessa a superfície inferior do coletor.

2.2. Montagem do Experimento

Cada sistema foi composto de uma caixa d'água de 50 litros, um reservatório com isolamento térmico em manta de lã de vidro com volume de armazenamento de 50 litros e um coletor solar de 1,0 m² em diferentes níveis, formando o sistema por circulação natural (termo-sifão), entre as tubulações de entrada de água fria para os coletores, saída de água quente dos coletores, interior dos reservatórios térmicos, corpo negro e caixa externa traseira do coletor, como mostrado na Fig. (1).

A caixa d'água em nível superior alimenta o reservatório térmico pela entrada de água fria localizado na parte inferior, este localizado acima do coletor solar o alimenta pela calha inferior, o qual, pela calha superior do coletor solar, interliga-se novamente pela entrada superior do reservatório térmico. Este reservatório possui um ponto para o consumo d'água e respiro, completando assim o ciclo de trabalho e permitindo a circulação natural de água quente pelo sistema.

As medições efetuadas nos coletores solares tiveram um tempo médio aproximado de aquisição de três dias por coletor, sempre comparando o coletor referência com o coletor amostra, permitindo através do sistema de aquisição de dados obter registro das diversas variações nos diferentes pontos de monitoramento, comparando assim o diferencial de temperatura e as perdas de calor tanto em dias ensolarados, nublados e no período noturno.



(a)



(b)

Figura 1. Vistas isométrica (a) e frontal (b) do sistema de aquecimento solar

A Figura (2) ilustra a fixação de termopares e um fluxímetro de calor no sistema mostrado na Fig. (1), responsáveis pela medição e armazenagem de dados através do sistema de aquisição Agilent 34970A.

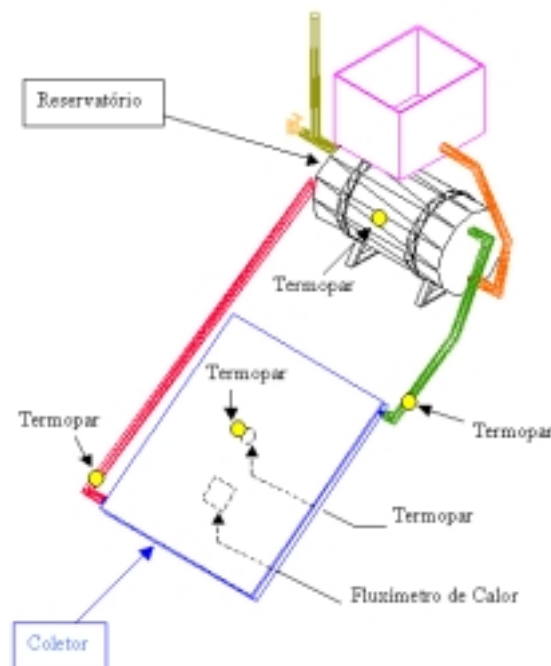


Figura 2. Representação esquemática com posicionamento dos termopares e fluxímetro de calor

2.3. Tomada de Dados

Os ensaios realizados foram feitos na base da substituição de diferentes tipos de coletores que sejam de interesse para a pesquisa (coletores amostra). A diferença entre eles está relacionada com o tipo de proteção do coletor (vidro, plástico, etc.). Cada um desses coletores amostra foi comparado com um coletor de referência, fixo, de material e isolamento pré-determinados.

Em cada ciclo de leitura do sistema de aquisição, obtiveram-se valores de temperatura interna do reservatório térmico, entrada de água fria e saída de água quente do coletor, temperatura na parte frontal e traseira do coletor, temperatura externa ou ambiente e fluxo de calor.

A Tabela (1) apresenta os modelos dos coletores utilizados nos ensaios.

Tabela 1. Tipos de coletores utilizados

Tipo de Coletor	Material de Cobertura Utilizado	Tipo de Isolamento
Referência – Ref	Vidro Pontilhado	Manta de Lã
Amostra – A1	Plástico	Manta de Lã
Amostra – A2	Sem Cobertura	Manta de Lã
Amostra – A3	Vidro Liso	Manta de Lã

A tomada de dados compreendeu o preenchimento de uma planilha para cada coletor solar com uma duração média de 72 horas, contendo as variáveis necessárias à análise dos diferentes modelos de sistema de aquecimento de água solar.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta sessão, apresentam-se resultados em termos de diferença de temperatura e fluxo de calor para os coletores listados na Tab. (1), i. e., alternando-se apenas o material utilizado para cobertura (vidro pontilhado, plástico, sem cobertura ou vidro liso).

3.1. Influência do Material de Cobertura

A Figura (3) mostra facilmente que a cobertura com plástico (Amostra A1) apresentou-se mais termicamente eficiente que a cobertura com vidro pontilhado. Através da média da diferença de temperatura, a cobertura plástica também se apresentou superior a de vidro em 1,2°C para o período analisado tal como mostrado na Fig. (3). Os parâmetros favoráveis a esse resultado devem-se possivelmente tanto à alta transmissividade do plástico empregado como à sua baixa condutância térmica.

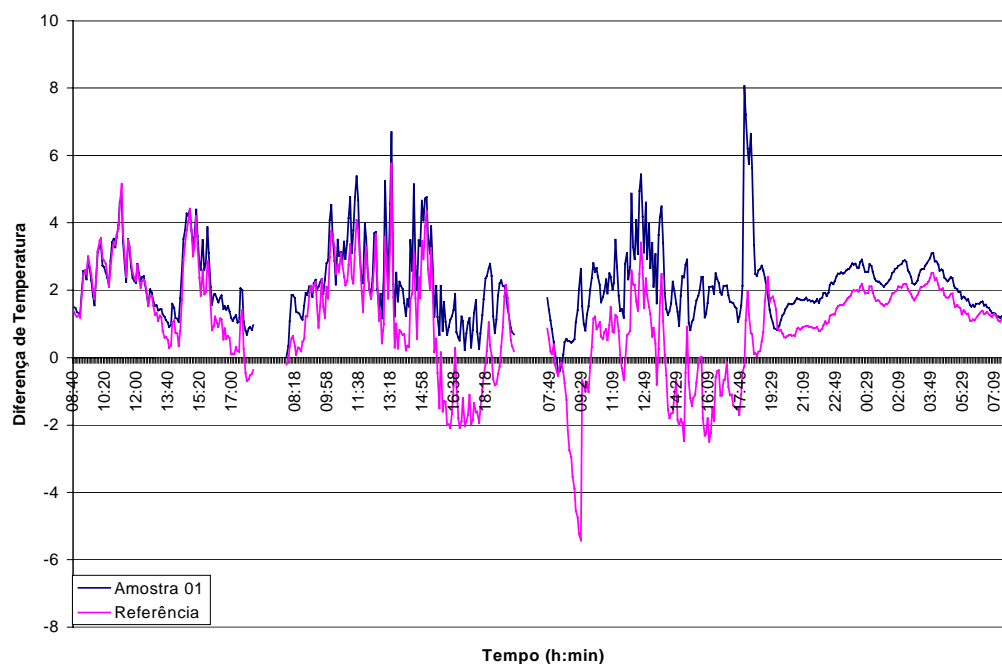


Figura 3. Comparação em termos de diferença de temperatura entre a entrada e a saída dos coletores com cobertura de plástico (A1) e de vidro pontilhado (Ref.)

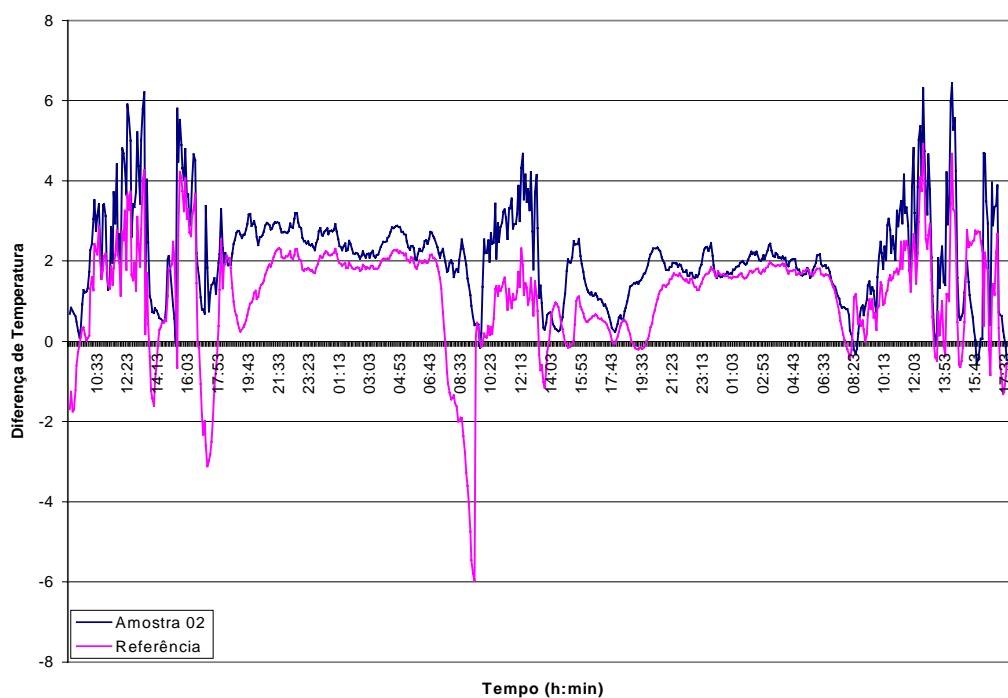


Figura 4. Comparação em termos de diferença de temperatura entre a entrada e a saída dos coletores sem cobertura (A2) e com cobertura de vidro pontilhado (Ref.)

A diferença de temperatura para o coletor sem cobertura é ilustrada na Fig. (4), mostrando que o efeito final da cobertura de vidro pontilhado pode ser a redução dos ganhos térmicos para elevação da temperatura da água. Lembra-se que o vidro pontilhado contribui com os aportes térmicos por prover o efeito estufa e por reduzir as perdas convectivas. No entanto, a sua presença reduz a quantidade da energia solar direta absorvida pela placa aletada do coletor. Dessa forma, entende-se que esse vidro é um material que não possui a transmissividade adequada para ser empregado no tipo de coletor analisado neste trabalho. Para o coletor sem cobertura, conseguiu-se uma média, em termos de diferença de temperatura entre a entrada e a saída do coletor, de $0,94^{\circ}\text{C}$ acima da obtida para o vidro pontilhado.

A diferença de temperatura para o coletor com vidro liso (Amostra 03) é ilustrada na Fig. (5), onde se verificou na média de temperatura que o efeito produzido pelo vidro liso é o aumento do ganho térmico em relação ao vidro pontilhado, sendo que o vidro pontilhado reduz os ganhos térmicos por radiação para elevação da temperatura da água. No coletor referência, a perda por convecção foi maior do que o ganho por radiação solar, o que resulta em uma diferença negativa de temperatura. Isto pode ter ocorrido devido à presença de nuvens e/ou correntes de ar frio. Desta forma, entende-se que o vidro liso empregado neste trabalho mostra-se como um material que possui uma transmissividade mais adequada em comparação com o vidro pontilhado, obtendo uma média de temperatura superior ao coletor de vidro pontilhado de $1,3^{\circ}\text{C}$.

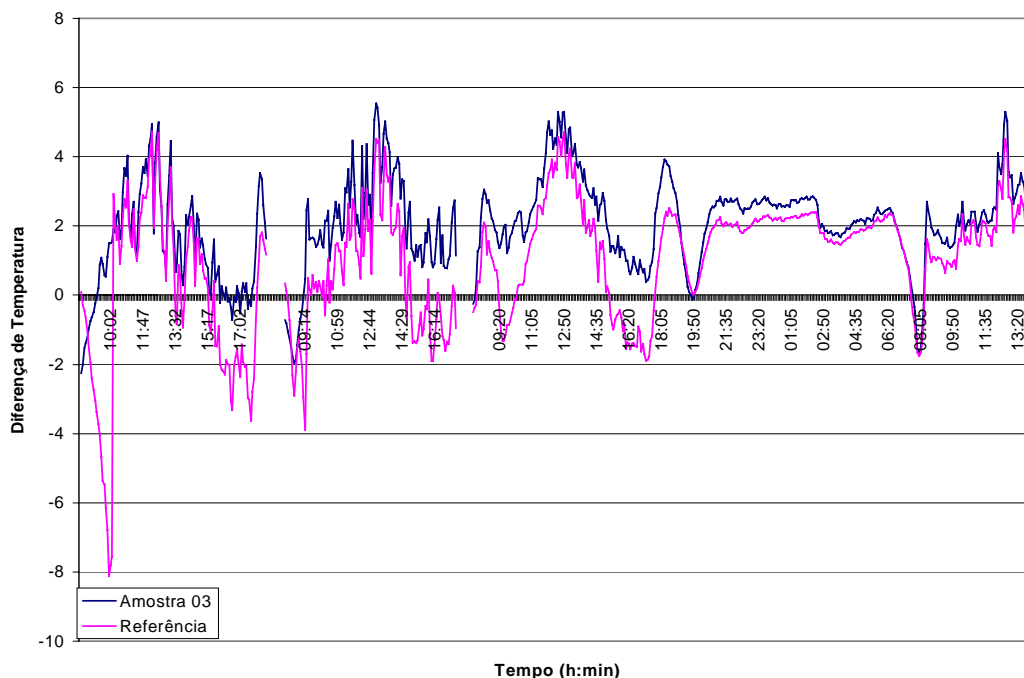


Figura 5. Comparação em termos de diferença de temperatura entre a entrada e a saída dos coletores com cobertura de vidro liso (A3) e de vidro pontilhado (Ref.)

Através dos resultados monitorados referentes às médias de temperatura de entrada de água fria, saída de água quente dos coletores solares e transferência de fluxo de calor, pode-se combinar os resultados, pretendendo desta forma obter um coletor solar com melhor comportamento térmico e menor custo, podendo ser designado neste caso como um Coletor Ótimo. A Tabela (2) mostra os resultados obtidos e materiais empregados no monitoramento.

Tabela 2. Resultados combinados

Coletores	Média de Fluxo de Calor (mW/m ²)		Média das Temperaturas (°C)		ΔT (°C)
	Perda	Ganho	Entrada	Saída	
Amostra – 01	$3,59 \times 10^{-5}$	$4,88 \times 10^{-5}$	26,26	28,43	2,17
Amostra – 02	$3,40 \times 10^{-5}$	$2,03 \times 10^{-5}$	22,58	24,67	2,09
Amostra – 03	$3,50 \times 10^{-5}$	$4,34 \times 10^{-4}$	31,85	33,89	2,04

Através da análise combinada dos materiais empregados no monitoramento dos coletores solares, pode-se verificar que o coletor de superfície plástica obteve um maior ganho de temperatura entre a entrada de água fria e saída de água quente de 2,17 °C, isto devido à alta transmissividade do material plástico empregado. Em relação ao fluxo de calor entre a superfície e a parte traseira do coletor pode-se observar um bom comportamento da manta de lã como isolamento, com um ganho médio de $3,99 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$.

3.2. Análise Econômica

A Tabela (3) apresenta os custos de cada amostra em relação ao custo do coletor referência, notando-se a importância da cobertura na avaliação de custos do sistema como um todo. Deve-se também salientar as condições de durabilidade desses materiais selecionados para o coletor ótimo, sendo o Termoplástico empregado na cobertura de superfície com uma durabilidade superior a dez anos, quanto à manta de lã de vidro, já se obtém dados de funcionamento de coletores com mais de vinte anos de uso sem avaria do material utilizado, podendo, assim, obter um coletor solar com bom aproveitamento térmico, com alta durabilidade, mas com custo superior ao do coletor referência.

Tabela 3. Análise combinada de coletores utilizados

Tipo de Coletor	Material de Cobertura	Isolamento Térmico	Custo Relativo %
Referência – Ref	Vidro Pontilhado	Manta de Lã	100
Coletor Ótimo	Plástico	Manta de lã	114,17
Amostra – A1	Plástico	Manta de Lã	114,17
Amostra – A2	Sem Cobertura	Manta de Lã	59,30
Amostra – A3	Vidro Liso	Manta de Lã	103,7

4. CONCLUSÕES

Em relação à cobertura de superfície utilizada, pode-se observar que o melhor material utilizado foi o termoplástico. Isto provavelmente tenha ocorrido pela natureza da matéria-prima empregada em sua composição, e também por apresentar um espaço de ar entre as superfícies externa e interna da chapa, fazendo que não haja uma significativa perda por refração na incidência dos raios solares, caso que não ocorre no vidro liso, e no vidro pontilhado, este por apresentar ondulações em sua superfície, o que provoca divergência entre os raios solares.

Surpreendentemente, observou-se também um bom rendimento térmico para o coletor sem cobertura, o que acarretaria uma redução ainda maior de custos (cerca de 40%) e permitiria a maior disseminação de seu uso para edificações populares. No entanto, a comparação pode ter sido beneficiada pela presença, no coletor utilizado como referência, de um vidro de baixa transmissividade para radiação de ondas eletromagnéticas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a grande dedicação ao presente trabalho, o excelente convívio e a amizade do bolsista Filipe H.C. Medeiros que faleceu no início do mês de fevereiro deste ano.

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Ref. 550093/01-0) pelas bolsas de pesquisa concedidas a integrantes do Laboratório de Sistemas Térmicos da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

6. REFERÊNCIAS

- Gomes D.G. & Fico N. G., 2000, “Otimização de Coletores Solares de Placas Planas”. In: Mercofrio 2000 – Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul, Porto Alegre.
- Mveh J.D.M., Prieb C.W.M. & Krenzinger A., 1998, “Eficiência de Coletores Solares sem Cobertura”, In: Mercofrio 1998 – Feira e Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul, Porto Alegre.
- Neto J.H.M., 2000, “Projeto, Fabricação, Montagem e Testes de Diferentes Protótipos de Coletores Solares Parabólicos Compostos “CPCS””, In: Mercofrio 2000 – Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação Do Mercosul, Porto Alegre.
- Siqueira A.M.O. & Krenzinger A., 1998, “Cálculo da Eficiência Diária em Média Mensal de um Sistema de Aquecimento Solar Operando em Regime de Termo-sifão”, In: Mercofrio 1998 - Feira e Congresso De Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul, Porto Alegre.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

THERMOECONOMIC ANALYSIS OF FLAT-PLATE SOLAR COLLECTORS

Abstract: *Conventional energy sources - still available for consumption, which use is often irrational - start to show indications of extinction, with consequent ecological disequilibria, which makes their cost to gradually increase and energy crises to be more evident. Among all alternative energy sources in use nowadays, the solar one should be considered as the most promising for being clean, safe and totally free. Besides that, it is remarkable its large field of applications in engineering such as in dryers, distillers, electric energy generation systems and water heating systems among many others. In this way, as the main goal is verifying flat-plate solar collectors efficiency for residential water heating systems, we have used different conditions of operations and materials. The fulfillment of this objective required experiments with a commercial model as the reference collector and other three different modules, allowing making comparisons of results in terms of temperature difference between the collector inlet and outlet and of heat flux across their lower surface as well. Results have shown that collectors without a cover material may give better thermal efficiency with a lower cost.*

Keywords: *flat-plate solar collectors, thermoeconomic analysis, solar heating.*