

MEDIDA DAS EFICIÊNCIAS TÉRMICAS DE AQUECEDORES SOLARES: UMA PROPOSTA DE ENVOLVER CONTEÚDOS DE FÍSICA BÁSICA E MODERNA PARA ALUNOS DAS ENGENHARIAS

Júlio César Penereiro – jcp@puc-campinas.edu.br

Denise Helena Lombardo Ferreira – lombardo@puc-campinas.edu.br

Lívia de Lima e Silva – ls_livia@hotmail.com

Monica Cristina Meschiatti – monicameschiatti@hotmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Campinas – PUC-Campinas

Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias - CEATEC

Rodovia D. Pedro I, km 136 – Parque das Universidades.

CEP: 13086-900 – Campinas – SP.

***Resumo:** O presente trabalho descreve a construção de dois coletores solares planos visando um estudo comparativo da eficiência térmica entre eles em função das velocidades de ventos. Um coletor foi feito com materiais de baixo custo e de fácil acesso à população, enquanto o outro é um coletor à venda no mercado. O trabalho tem como meta aliar o ensino de física ao conhecimento envolvido na construção e funcionamento de um sistema de aquecimento solar de água. Trabalhou-se de forma prática com os conceitos de temperatura, medindo a da água em pontos estratégicos da entrada e saída do coletor, assim como a contida num reservatório. Para essa finalidade, desenvolveu-se um sistema automático de medidas de temperaturas, irradiação solar e velocidade de vento, intermediadas com uma placa controladora e interfaciados com um microcomputador. Realizou-se o levantamento da curva-resposta dos coletores solares e uma estimativa das suas eficiências de absorção de energia solar, em função da velocidade do vento, para os dois equipamentos.*

***Palavras-chave:** Aquecedor solar de água, Influência do vento, Medida de eficiência, Sistema fechado em aquecedores solares.*

1 INTRODUÇÃO

Um dos problemas que caracteriza a sociedade é o grande desperdício de energia. Esse consumo desenfreado de energia traz como consequência uma preocupação constante na produção e/ou geração em grande escala, acarretando uma crescente degradação do meio ambiente. Conscientizar a população a respeito desses problemas e buscar por fontes alternativas de energia são processos importantes, mas que, invariavelmente, podem ocorrer de forma muito lenta. O ideal seria incluir uma política educacional que conscientizasse os cidadãos para com relação às questões energéticas e ambientais.

A iminência de um problema de crise energética no Brasil aumenta juntamente com o crescente consumo que o país vem apresentando, decorrentes, em parte, do aumento populacional e do aumento do padrão de vida de algumas classes sociais. A procura por fontes energéticas alternativas parece ser uma opção para que os brasileiros possam produzir a totalidade da energia aqui consumida. Não obstante, o uso de aquecedores solares em habitações populares e o incentivo ao uso de sistema termossolar em edificações em geral,

constituem-se nas medidas de curto prazo mais apropriadas para iniciar um processo do uso de energias limpas e renováveis com alcance social e econômico (PROCEL, 2007).

A necessidade de se criarem incentivos aos aquecedores solares para substituírem os chuveiros elétricos nos levou a desenvolver este trabalho de pesquisa. Objetivando a identificação de suas características técnicas e seus parâmetros físicos, trabalhou-se com dois aquecedores diferentes: um didático e de baixo custo e outro disponível no mercado e comumente usado em residências e comércios. Ambos foram construídos sobre uma bancada de ensaios onde dados experimentais foram coletados. Visando a medida da eficiência térmica desses aquecedores, instalaram-se sensores digitais de temperaturas em posições estratégicas do fluxo de água, além de um Solarímetro e um Anemômetro, todos acoplados a um microcomputador para aquisição automática de dados. Essas facilidades permitiram inferir uma estimativa da eficiência térmica total dos equipamentos em ensaios independentes e, através de curva-resposta, possibilitou comparar essas medições.

A proposta aqui apresentada é no sentido de motivar e encorajar professores e grupos de estudantes de diferentes cursos de Engenharias a construírem em suas escolas e/ou residências um equipamento equivalente ao de baixo custo, além de poder usá-lo para entender e estudar os processos físicos relacionados à termodinâmica, radiação eletromagnética e de um corpo negro, lei de Stefan-Boltzmann, campo magnético terrestre, os movimentos da Terra, as estações do ano, o efeito estufa e o aquecimento global, além de ao mesmo tempo valorizar o uso da energia solar.

2 METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado no Centro de Ciências Exatas e de Tecnologias (CEATEC) da PUC-Campinas, SP. Para implementação do mesmo foram desenvolvidos dois equipamentos de aquecimento de água por meio da energia solar empregando o tipo passivo direto para o sistema hidráulico. Como descrito em Penereiro, Melo e Coradi (2010), o primeiro equipamento foi construído de forma artesanal sendo a montagem da parte principal do coletor solar plano feita em PVC e sem cobertura de vidro. No segundo equipamento utilizou-se um coletor de padrão metálico (alumínio e cobre) existente no mercado, neste caso todo sistema de coleta de radiação solar foi envolvido com uma cobertura de vidro para provocar um efeito estufa interno.

Nesses coletores solares a água é aquecida diretamente e sua circulação é realizada por termossifão, ou seja, a diferença de densidade devido à variação de temperatura entre os coletores e o reservatório provoca gradientes de pressão que coloca o fluido em movimento. A montagem da bancada de ensaio, bem como do sistema de aquisição de dados são discutidos em detalhes nas seções subsequentes.

Alguns trabalhos visando medidas das eficiências térmicas quando se empregam coletores solares de baixo custo foram realizados por outros autores (NIEMEYER, 2006; PEREIRA *et al.*, 2006; NETTO, 2006, PENEREIRO; MELO; CORADI, 2010), no entanto todos eles abordaram linhas de pesquisas diferenciadas da que é discutida a seguir. O intuito da presente pesquisa é realizar um estudo comparativo entre os dois tipos de coletores descritos acima, principalmente no que concernem as medidas das eficiências térmicas desses dispositivos, disponibilizando um meio didático-experimental para o professor interessado no tema usá-lo em suas atividades de ensino.

2.1 Coletor Solar de PVC e o Coletor Solar Comercial de Metal

O perfil de PVC extrudado, desenvolvido pela “Indústria de Plásticos TWB Ltda.”, compõe a parte principal do coletor solar plano de baixo custo. A montagem, realizada de forma artesanal, empregou tubos de PVC de $\frac{3}{4}$ de polegada que foram cortados longitudinalmente de forma que as abas dos perfis de PVC pudessem ser dobradas para dentro ou até mesmo quebradas quando necessário, sendo fixados com um adesivo epóxi marca Araldite. Este processo apresenta como vantagem o baixo custo para pequenas quantidades, mas possui como desvantagem a baixa estanqueidade das bordas, por serem coladas. O passo seguinte à montagem foi lixar a superfície do coletor plano (Figura 1a) e, por meio de um rolo, foi pintado com tinta esmalte sintético de cor preta fosca (Figura 1b).

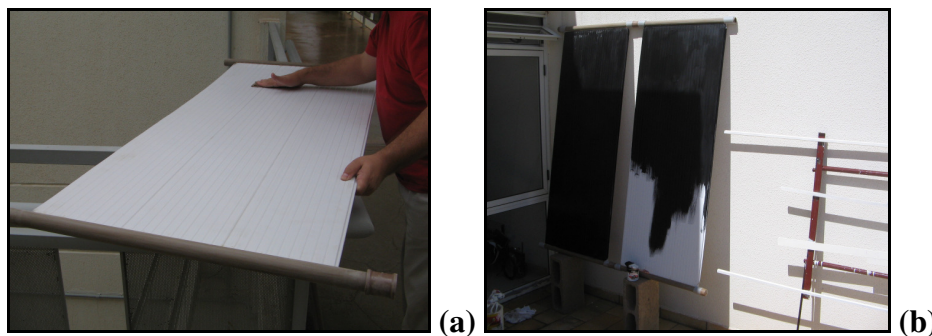


Figura 1 – (a) Preparo do coletor solar de PVC após colagem das peças. (b) Pintura do perfil antes de fixá-lo à bancada de ensaios.

O dispositivo apresenta facilidade no seu transporte devido as suas dimensões (1,89 m X 0,90 m) e ao seu peso (aproximadamente 2,37 kg). Após todos os cuidados inerentes do processo de montagem artesanal, o coletor solar plano de baixo custo encontrou-se pronto para ser instalado ao sistema hidráulico.

Principalmente devido à resistência e durabilidade, o padrão comercial de coletores solares emprega materiais metálicos, como o alumínio e cobre. Além desses, utiliza-se vidro (normalmente de espessura entre 8,0 a 10,0 mm) na face voltada para o Sol, para criar um ambiente que permita a conservação da irradiação solar coletada. O coletor usado nessa pesquisa foi desenvolvido pela “Empresa Atual Ind. e Com. de Aquecedores Solares Ltda.”, modelo “Standard Master Plus”. Esse dispositivo possui dimensões são de 1,82 m X 0,91 m e peso de aproximadamente 14,75 kg.

2.2 A bancada de ensaios

Para realização de ensaios experimentais decidiu-se construir uma montagem utilizando um reservatório plástico (caixa d’água em PVC com capacidade de 100 litros) com isolamento térmico (paredes internas em placas EPS, poliestireno expandido, e revestido com plástico negro) instalado em série com as placas dos coletores solares (Figura 2). O sistema foi alimentado com água da rede hidráulica, sendo o fluxo hídrico controlado por uma bóia d’água, por válvulas de agulha e por registros de esfera.



Figura 2 – A bancada de ensaios em seu formato final com os coletores solares, o reservatório d’água e os dispositivos de aquisição de dados.

Para as tubulações da bancada foram empregados tubos de $\frac{1}{2}$ polegada, conexões e registros em PVC, pois esses materiais apresentam baixo custo e possuem boa flexibilidade, facilitando montagens em curvas e desníveis. A única exceção foi realizada junto à tubulação próxima aos coletores onde, nesses casos, foram usadas tubulações maleáveis empregando conduíte plástico negro.

Os dois coletores foram fixados sobre um telhado, confeccionado por telhas produzidas com resíduos de fibras vegetais e betume (marca: Onduline), dimensões de 2,00 m X 2,50 m. Por sua vez, esse telhado foi fixado a uma bancada metálica que permite ajustes do ângulo de incidência da irradiação solar. Para oferecer uma menor variação do fluxo de irradiação ao longo do ano, todo sistema foi ajustado e direcionado para o norte geográfico empregando o método do gnômon, isto é, uso de um ponteiro que marca a altura do Sol pela direção da sombra projetada. Ao mesmo tempo, empregou-se uma inclinação de 31° em relação a horizontal. A imagem da Figura 2 mostra detalhes da bancada de ensaio com os coletores solares instalados sobre ela, além de toda a instrumentação para aquisição de dados que será descrita a seguir.

2.3 Instrumentação e aquisição dos dados experimentais

Visando medir as eficiências térmicas dos coletores solares, realizou-se a instrumentação da bancada de ensaios. Foram empregados 6 sensores digitais de temperaturas (modelo: DS1820, fabricante: Dallas Semiconductor), acoplados a uma placa controladora, especialmente desenvolvida, conectada através da entrada RS232 de um microcomputador tipo PC (Figura 3a). Cada sensor foi inserido no circuito hidráulico por meio de um acessório em PVC no formato de T, com tampa rosqueada pela qual foi feito um furo para a inserção do dispositivo de medição. Para promover a estanqueidade do furo por onde passa a fiação, foi empregada uma cola epóxi Araldite. As temperaturas foram medidas continuamente através de sensores de temperatura.

Os dados da irradiação solar foram obtidos com emprego de um Solarímetro CMP22, fabricante: Kipp & Zonen. As medidas das velocidades de ventos foram registradas por meio de um Anemômetro (Figura 3b), marca: Oregon WMR928NX. Esses equipamentos foram montados ao lado da bancada de ensaios e conectados ao microcomputador, usando uma placa do tipo Arduino (modelo: Duemilanove 2009 AVR ATmega328), conectada na saída USB (Figura 3c), que registrou todas as medições durante cada ensaio experimental.

A calibração de cada dispositivo foi realizada previamente e de forma separada. Para os sensores de temperatura foram realizadas comparações dos sinais adquiridos pelas leituras no monitor do microcomputador com os valores medidos com um termômetro de mercúrio, empregando um Becker contendo água que foi aquecida de maneira controlada por meio de

um aquecedor elétrico manual. Por meio de análises gráficas foi possível certificar que os sensores empregados eram de boa qualidade e estavam operando em condições ideais para os regimes de temperaturas que os coletores solares deviam estar operando.

Tanto o Solarímetro como o Anemômetro foram calibrados obedecendo às informações contidas nos manuais técnicos desses respectivos equipamentos.



Figura 3 – Sistema de aquisição de dados dos aquecedores solares. (a) Placa controladora dos sensores de temperaturas. (b) Solarímetro e Anemômetro instalados ao lado dos coletores. (c) Placa Arduino para leitura dos dados de irradiação solar e velocidades de ventos.

Um procedimento computacional específico para o reconhecimento de cada sensor e a leitura dos dados foi especialmente desenvolvido em programação PYTHON, utilizando o ambiente de desenvolvimento ECLIPSE. Esse procedimento, além de reconhecer cada dispositivo nas portas USB e RS232, interpreta o valor da medição num determinado instante e geram gráficos, bem como atualiza um arquivo de dados contendo informações do horário e os valores das medições. A Figura 4 mostra uma tela ilustrando um passo de aquisição de dados para um ensaio específico.

Todas as medições e cálculos a seguir foram armazenados em arquivos compatíveis ao *Microsoft Excel*, de forma que pudessem ser analisadas por qualquer usuário.

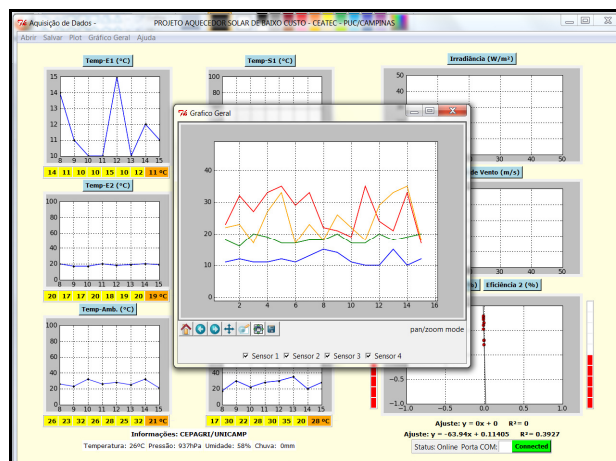


Figura 4 – Ilustração da tela do programa PYTHON para o procedimento de aquisição de dados dos coletores solares.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Embora o objetivo de um aquecedor solar seja apenas o de obter água aquecida no reservatório para uso doméstico e/ou industrial, os coletores solares montados sobre a bancada de ensaios desenvolvida teve como objetivo específico o de realizar medições quantitativas para inferir suas eficiências térmicas. As seções seguintes têm o intuito de expor

como esses procedimentos foram realizados a partir de vários ensaios experimentais.

3.1 Análises das eficiências dos coletores solares como função das velocidades de ventos

Pode-se dividir em quatro partes um sistema de aquecimento que usa a energia solar como fonte primária: a captação da energia irradiante, o aquecimento da água pelo coletor, o transporte da água entre o coletor e o reservatório e o armazenamento desta. No entanto, apenas uma parcela da irradiação que incide no coletor é de fato utilizável para o aquecimento da água. A energia útil é avaliada pelo ganho de calor que a água tem devido sua circulação pelo coletor solar. Ela pode ser determinada por meio da relação:

$$Q = \dot{m} \cdot C \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

onde: Q representa o fluxo de energia que chega ao reservatório (W); \dot{m} é o fluxo de massa de água (kg/s); C é o calor específico da água (kJ/kg°C); T_1 e T_2 são as temperaturas da água fria e quente, respectivamente, antes e após ter passado pelo coletor (°C). Desta forma, a energia utilizável é a energia térmica armazenada no reservatório, calculada apenas quando a água está acima de uma temperatura considerada ideal para utilização (T^*)¹, que pode ser inferida através da equação (1).

A eficiência térmica (η) do coletor solar de área útil exposta à radiação solar (A_c) é definida como a razão entre o ganho útil de energia durante um período de tempo e a energia solar incidente neste mesmo período (DUFFIE; BECKMAN, 1991; PENNEREIRO; MELO; CORADI, 2010):

$$\eta = \frac{\int_0^t Q_u \cdot dt}{A_c \cdot \int_0^t G_T \cdot dt} \quad (2)$$

Enquanto que a eficiência instantânea pode ser extraída pelo balanço de energia e é dada em função das temperaturas. Essa informação pode ser obtida pela relação (DUFFIE; BECKMAN, 1991):

$$\eta = Fr \cdot (\tau\alpha) - Fr \cdot U_L \left(\frac{T_{exp} - T_{amb}}{G_T} \right) \quad (3)$$

O termo T_{amb} refere-se à temperatura do meio ambiente, enquanto que T_{exp} é a temperatura experimental. Esta última pode ser tomada como sendo a temperatura de entrada (T_1) ou a de saída (T_2) do fluido, ou ainda a média entre elas (T_{med}). O termo G_T representa a irradiação solar total e U_L o fator global de transferência de calor. Fr representa o fator de remoção de calor (é a quantidade real de calor absorvida e a máxima quantidade de calor possível que pode ser transferido) e depende do coeficiente de correção ($\tau\alpha$) (sendo: τ a transmissividade e α a absortividade (ASHRAE, 1996). Assim, a eficiência térmica pode ser entendida como uma medida inversamente proporcional à diferença entre as temperaturas, isto é, quanto maior for essa diferença, menor a eficiência medida. Este, no entanto, não é o único fator a ser considerado no cálculo da eficiência. O tipo de superfície absorvedora, o número de coberturas transparentes, a intensidade da irradiação solar, o isolamento térmico empregado no coletor, as velocidades de ventos, dentre outros, exercem influências na determinação da eficiência do aquecedor solar.

¹ Optou-se por uma temperatura de 50 °C, que é considerada boa para aplicações domésticas (ABNT-NBR 7198/82).

Por intermédio da equação (3), foram construídos, a partir de dados instantâneos para os dias 08/fev./2011, os gráficos da η versus $\left(\frac{T_e - T_{amb}}{G_T}\right)$ apresentados na Figura 5. Todos dados referem-se a uma vazão fixa em 0,020 kg/s e para três intervalos de velocidades de ventos trabalhados nessa pesquisa, a saber: 1,00 a 1,50 m/s (em verde); 1,51 a 2,00 m/s (em azul) e 2,01 a 2,75 m/s (em vermelho). Empregando regressão linear, retas foram ajustadas aos pontos experimentais utilizando a equação (3) para o coletor solar de baixo custo (Figura 5, superior) e o coletor solar de metal (Figura 5, inferior).

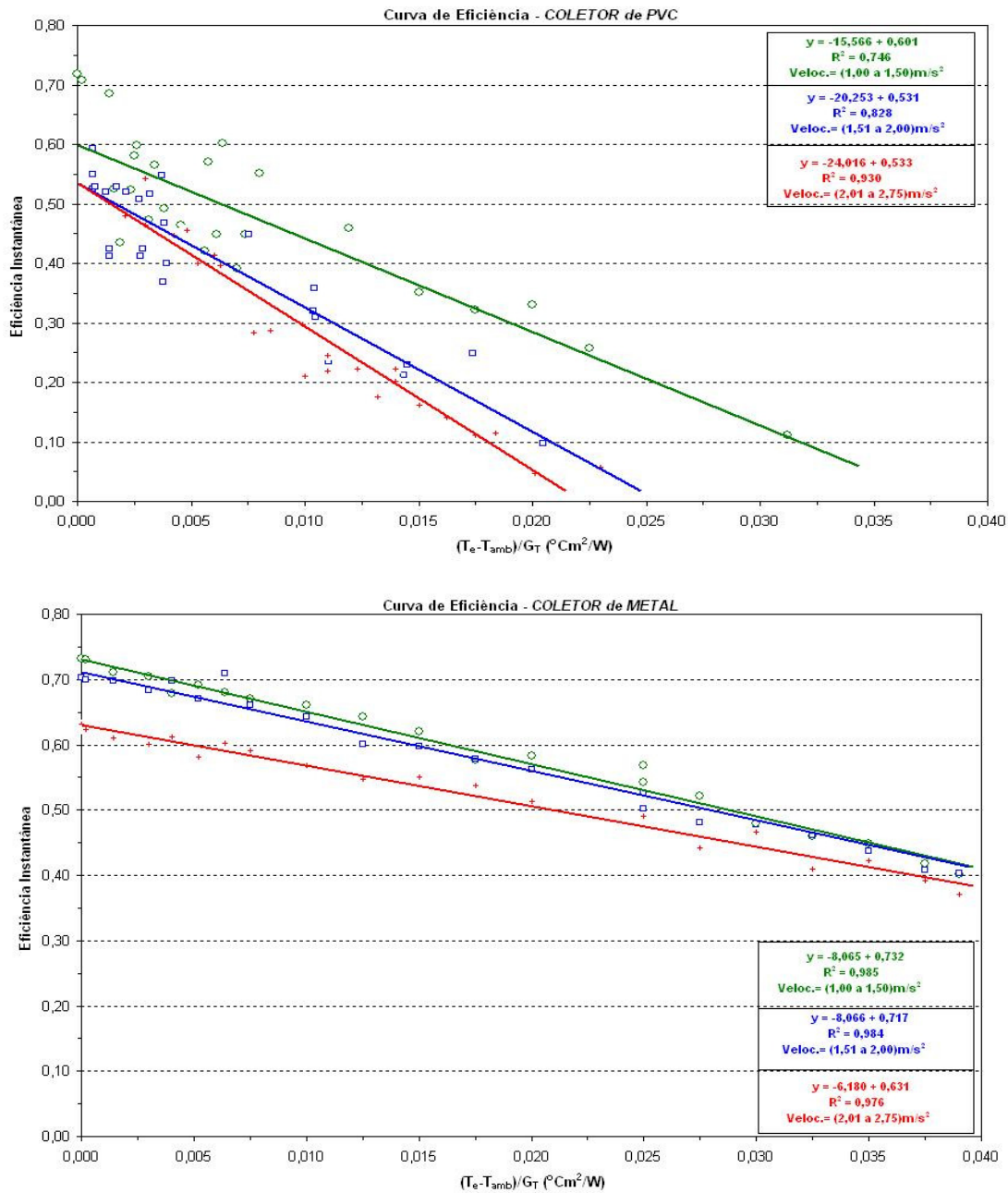


Figura 5 – Gráficos da η (eficiência térmica) versus $\left(\frac{T_e - T_{amb}}{G_T}\right)$ para diferentes intervalos da velocidade de vento.

Vale ressaltar que a interceptação de uma reta ajustada no eixo Y representa a medida do rendimento máximo (em média) que um determinado coletor solar pode apresentar (PENNEREIRO; MELO; CORADI, 2010). Para os casos aqui avaliados, as equações das retas ajustadas aos pontos inferidos para os coletores, correspondente ao intervalo de velocidades de ventos, estão contidos nos gráficos.

Por meio de uma rápida inspeção dos gráficos das Figuras 5 é possível verificar que as velocidades de ventos afetam consideravelmente as medidas das eficiências térmicas de ambos coletores, sendo que na medida em que as velocidades aumentam as eficiências térmicas diminuem. No caso do coletor solar de PVC isso se torna mais evidente, pois como esse dispositivo não possui cobertura de vidro (como é o caso do coletor de metal), a dissipação do calor retido no material que compõe o coletor é maior.

Como era esperado, e isso deve ser levado em consideração para todos os ensaios realizados, a eficiência do coletor de metal é superior ao valor encontrado para o coletor de PVC. Porém, é surpreendente ter constatado que em média esses valores tenham sido de 22% de diferença. Isso coloca o coletor solar de PVC numa situação curiosa frente ao outro dispositivo, principalmente quando se pensa em termos de custos. Infelizmente, a resistência e durabilidade do material de PVC são fatores de comparações desvantajosos, mas que podem ser trabalhados quando se propõe colocar um sistema de proteção metálico e com cobertura de vidro num coletor de PVC. Mas essa é uma tarefa que se pretende realizar no futuro.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Vários conteúdos discutidos nas disciplinas de Física Básica e Moderna podem ser explorados e discutidos por um professor em sala de aula de cursos de engenharias, em particular, as Engenharias Ambiental, Civil, Elétrica, Mecânica e Computação. A construção e demonstrações das vantagens do uso de coletores solares para aquecimento de água podem motivar alunos em outras tarefas experimentais abordando temas do cotidiano. Sua utilização em atividades acadêmica permite desenvolver estudos baseados em conceitos da física térmica, além de poder realizar uma exploração qualitativa e quantitativa que podem ser discutidos e elaborados por alunos de um curso universitário. Estes estudos conduzem o aluno a uma maior compreensão da importância de estudos teóricos para a otimização de aplicações técnicas, e serve como ferramenta para o professor poder discutir não apenas os aspectos técnicos envolvidos, mas também trabalhar seu papel de formador de cidadãos (ARAÚJO; ABIB, 2003), explorando e discutindo fontes alternativas de energias, impactos ambientais, além de mencionar e incentivar que o consumo de energia elétrica pode ser reduzido em até cerca de 40% com o uso de coletor solar.

O presente trabalho discute os procedimentos para obter as medidas das eficiências térmicas, a partir de uma bancada de ensaios composta de dois coletores solares de materiais diferentes (PVC e metal). Esses procedimentos envolvem diferentes conteúdos de Física Básica e Moderna, e que podem ser explorados em sala de aula, ou até mesmo fora dela, em atividades experimentais. A proposta aqui apresentada é também uma alternativa didática de atuação, sendo factível de ser implementada em cursos de Engenharias, pois os materiais envolvidos nos dois coletores são de baixo custo e fácil instalação.

Finalmente, pode-se afirmar que um trabalho nessa linha de atuação permite uma considerável intersecção entre diferentes modalidades das Engenharias, como a Física, a Eletrônica, A Informática, O Meio Ambiente, dentre outras. Considera-se que o tipo de atividade aqui proposta favorece uma formação mais geral para o futuro profissional engenheiro e, dessa forma, facilita o exercício pleno de suas funções na sociedade.

Agradecimentos

LLS e MCM agradecem as bolsas, em nível de iniciação científica, nas modalidades FAPIC/PUC-Campinas e PIBIC/CNPq, respectivamente.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **ASHRAE Handbook**: heating, ventilating and air-conditioning systems and equipment. Atlanta, 1996. Cap. 33.

ARAÚJO, M. S.; ABIB, M. L. S. Atividades experimentais no ensino de física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.25, n.2, p.176-194, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT-NBR 7198/82**: Instalações prediais de água quente, 1982.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 2^a ed. Wisconsin: John Wiley & Sons, 1991.

NETTO, C. Q. **Análise de um pequeno sistema de aquecimento solar instalado no interior do Estado de Minas Gerais**. Monografia do Departamento de Engenharia da UFLA, Lavras, MG, 2006.

NIEMEYER, R. C. **Construção de um coletor solar inflável**. TCC do Departamento de Engenharia Mecânica da UNB. Brasília, DF, 2006.

PENEREIRO, J. C.; MELO, L.P.; CORADI, T.B.. Construção de um aquecedor solar de baixo custo sem cobertura: análise experimental da eficiência térmica para vários ensaios. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v.10, n.1, p.18-34, 2010.

PEREIRA, R. C.; SHIOTA, R. T.; MELLO, S. F.; ASSIS JR., V.; BARTOLI, J. R. Eficiência térmica de coletores solares de baixo custo – CSBC. 17. CBECIMat, **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, 2006.

PROCEL. Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso: ano base 2005. **PROCEL-ELETROBRAS**, 2007.

**TERMIC EFFICIENCY MEASUREMENT OF SOLAR COLLECTORS:
A PROPOSE TO INVOLVE CONTENTS OF BASIC AND MODERN
PHYSICS TO ENGINEERING STUDENTS**

Abstract: *The present work describes the construction of two flat solar energy collectors, in order to make a comparative study of thermal energy, in function of the wind's velocity. One was made using low cost materials and can be easily acquired by population, while the other is a common collector commercially available. This task carries as a goal the lining up of physics teaching and the knowledge in the construction and functioning of a solar water heater system. The work was carried on in a practical way with the temperature concepts, measuring the water at strategic points in the collector, in its entrance and exit, as well as the reservoir contained. In order to do it, an automatic temperature, solar radiation and wind velocity measuring system, intermediated by a controlling board and interfaced with a microprocessor was developed. We collected data and projected a solar energy collector answering-curve and estimated its solar absorption efficiency, in function of wind's velocity, for the two equipments.*

Key-words: *Solar water heating, Wind influence, Efficiency measured, Closed-loop solar heaters.*