



Projeto, Simulação e Teste de Coletores Solares de Placa Plana Utilizando Materiais Poliméricos

Cláudio Soave ¹, Mario H. Macagnan ²

¹ PPGEM/ Universidade do Vale do Rio dos Sinos (csoave.eng@gmail.com)

² PPGEM/ Universidade do Vale do Rio dos Sinos (mhmac@unisinos.br)

Resumo

Os dois principais equipamentos dos sistemas de aquecimento solar (SAS) são o coletor e o reservatório térmico, os quais representam a maior parte dos custos envolvidos pelo uso de materiais nobres, como o aço inoxidável, o cobre e o alumínio. Para sua maior difusão é necessário que o preço seja compatível com a realidade das famílias de baixa renda e que os custos dos materiais e dos processos de fabricação sejam reduzidos. Os polímeros possuem propriedades interessantes para a aplicação na construção de coletores solares de baixa temperatura, como fácil moldagem, baixo peso e baixo custo. Para auxiliar no desenvolvimento dessa tecnologia será apresentado o projeto, construção e teste de um protótipo de coletor solar utilizando material polimérico, a fim de avaliar sua viabilidade técnica. Foram realizadas simulações para o estudo de diversas geometrias de canais retangulares e seu impacto no desempenho térmico dos coletores e foram buscadas formas de desenho a fim de contornar o problema da baixa condutividade térmica dos polímeros. Um protótipo de coletor solar foi construído e ensaiado para determinação de seu desempenho térmico, mostrando resultados promissores para o uso dessa tecnologia.

Palavras-chave: Energia Solar, Coletores Solares de Placa Plana, Polímeros.

Área Temática: Energia e Energias Renováveis

Use of Polymeric Materials for Construction of Flat Plate Solar Collectors

Abstract

The two mains equipment of solar water heating systems are the collector and the thermal reservoir which represents the majority of the costs involved by the use of noble materials such as stainless steel, copper and aluminum. For greater diffusion is necessary that its price be consistent with the reality of low-income families and that the costs of materials and manufacturing processes are reduced. The polymers have interesting properties for application in building low-temperature solar collectors, like easy molding, low weight and low cost. To aid in developing of this technology will be presented the design, construction and testing of a prototype of solar collector using polymeric material to assess its technical feasibility. Simulations were performed to study various geometries of rectangular ducts and the impact on the thermal performance of the collector. New design channel shapes were studied in order to circumvent the problem of low thermal conductivity of polymers. A prototype solar collector was built and tested to determine the thermal performance, showing promising results for the use of this technology.

Key words: Solar Energy, Solar Flat Plate Collectors, Polymers

Theme Area: Energy and Renewable Energies



1 Introdução

O aproveitamento da energia solar térmica para aquecimento de água em substituição aos chuveiros elétricos no Brasil apresenta-se como uma boa alternativa para a diminuição dos custos de energia elétrica nas famílias de baixa renda. O Brasil apresenta um alto potencial para o aproveitamento energético solar disponível e acessível a toda a população.

A utilidade desse recurso pode se caracterizar como um meio de aumentar a oferta de energia no mercado, alavancando o desenvolvimento e minimizando o pico de consumo de energia elétrica que ocorre principalmente entre às 18h e 21h.

Segundo o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL, 2010), cerca de 73% da população utiliza o chuveiro elétrico para aquecimento da água para banho. Do consumo energético total no Brasil, o setor residencial é o responsável por cerca de 11%, sendo que 24% a 30% desta energia é empregada para o aquecimento de água com o uso no chuveiro elétrico.

Conforme a ANEEL (2010), aproximadamente 43% do custo de uma conta de energia elétrica de uma família de baixa renda está relacionado com o aquecimento da água. De fato, o uso massivo de chuveiros elétricos para o aquecimento de água para banho é um aspecto que onera tanto para o consumidor residencial como também para o sistema elétrico brasileiro.

No entanto, o custo atual dos coletores solares existentes no mercado brasileiro dificulta sua utilização pelas classes menos favorecidas da população. Para realizar essa substituição, seria necessário que o custo fosse reduzido em aproximadamente 50%, fato que se revela como a principal dificuldade em difundir essa tecnologia de uma forma intensiva (KÖHL, 2005). Nesse contexto o desenvolvimento de novas tecnologias em projetos de coletores solares térmicos de boa durabilidade, baixo custo de produção, instalação, manutenção e adequado rendimento é o desafio para atender às necessidades do mercado brasileiro.

Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de um novo conceito de coletor solar plano para aquecimento de água para uso doméstico, inteiramente construído com materiais poliméricos. Serão apresentadas as etapas realizadas para a simulação do desempenho térmico do coletor, construção e os ensaios de rendimento.

2 Uso de materiais poliméricos em coletores solares

Os coletores solares planos, em sua maioria, são fabricados com materiais metálicos (cobre e alumínio, principalmente) não havendo ainda uma expansão significativa do uso de materiais poliméricos para o desenvolvimento dessa tecnologia, com exceção dos coletores para aquecimento de água em piscinas.

Existem vários desafios para o uso de coletores solares poliméricos. Entre eles o desenvolvimento de materiais resistentes à alta temperatura e a exposição aos raios ultravioletas, o custo e os processos de fabricação, a vida útil compatível com os coletores metálicos e o menor rendimento que esses coletores apresentam.

A viabilidade econômica dos sistemas solares para aquecimento de água é fortemente relacionada com o custo dos coletores. Uma abordagem atraente para redução de custos é substituir o vidro e as peças de metal por materiais com custo mais acessível e com baixo peso, como os polímeros. A redução de peso irá diminuir o custo do transporte, manuseio e instalação. A utilização de materiais poliméricos também permitirá a redução dos custos associados aos processos de fabricação, como a redução do número de peças, facilidade de montagem nas linhas de produção, facilidade de logística e de instalação.

Um desafio chave é manter o desempenho adequado do sistema e garantir a durabilidade necessária para vidas tão longas quanto as dos sistemas tradicionais. Esse



conceito começa a ser reconhecido e aceito em todo o mundo. O ambiente onde os materiais serão expostos é em geral muito agressivo, pois devem suportar os efeitos da radiação UV, altas temperaturas, umidade elevada, chuva, condensação, poluentes do ar, etc. Polímeros podem ser muito sensíveis à radiação UV, especialmente em combinação com altas temperaturas. A escolha de polímeros para aplicações solares requer grande cuidado, especialmente em coletores, devido ao fato de que a sua durabilidade é geralmente menor do que a dos materiais que substituem, mas oferecem significativas vantagens de fabricação. Materiais como poliéster, PEEK, PPS, PEI, PSU, são polímeros com boa resistência à temperatura e aos raios UV. No entanto, alguns deles podem ser difíceis de manufaturar, além de possuírem alto custo e limitações do mercado fornecedor. Uma alternativa para encontrar o "melhor" tipo de polímero pode ser aceitar uma vida útil limitada, mas usar uma construção que permita uma substituição fácil (KÖHL, 2005).

Neste contexto novos materiais poliméricos estão sendo estudados para uso em sistemas de aquecimento solar de água, em termos de funcionalidade e design. Simultaneamente, a competitividade econômica pode ser melhorada através da redução dos custos dos sistemas, conduzindo assim a uma maior penetração no mercado.

O estudo de coletores solares poliméricos não é novo. Edlin (1958) estudou o uso de filmes plásticos transparentes em substituição ao vidro e determinou algumas propriedades óticas e mecânicas desse material. No seu trabalho pioneiro, Tabor (1961) já citava a possibilidade do uso dos novos materiais para cobertura dos coletores, o PVC transparente, e os problemas decorrentes da elevada transmissividade desse material para a radiação na faixa do infravermelho. Blaga (1978) realizou uma ampla revisão do estado da arte do uso de materiais poliméricos em coletores solares, apresentando dados sobre o envelhecimento desses materiais quando expostos a condições externas e em câmaras climáticas. A construção de coletores com materiais poliméricos para aplicações em temperaturas abaixo de 60 °C foi estudada por Addeo et al. (1980), analisando o desempenho de protótipos e obtendo resultados satisfatórios.

O estudo da substituição do absorvedor metálico por polímeros iniciou na década de 1990. Van Niekerk (1996) realizou uma pesquisa utilizando coletores com tubos de polipropileno e placa absorvedora de polietileno de alta densidade, em uma configuração similar aos coletores metálicos tradicionais, analisando o efeito dos parâmetros geométricos na sua eficiência.

Estudos estão sendo realizados por diferentes instituições de pesquisa com o objetivo de analisar o desempenho de novos coletores solares construídos com materiais poliméricos, incluindo testes utilizando a exposição prolongada em condições ambientais externas dos materiais além de ensaios acelerados em câmaras climáticas. Também estão sendo analisados novos compostos para serem utilizados em coberturas de coletores, com o intuito de evitar a degradação ótica e mecânica (amarelamento e ressecamento) causada pela exposição à temperatura e à radiação UV.

A cobertura do coletor solar deve apresentar elevada transmissividade em todo o espectro solar e baixa transmissividade no espectro do infravermelho e deve resistir à longa exposição (10 a 20 anos) em condições de serviço, incluindo altas temperaturas e exposição aos raios UV. Também devem manter a integridade mecânica (por exemplo, resistência ao impacto e a rigidez). Jorgensen et al. (2005) analisaram vários arranjos poliméricos com filmes de policarbonato para a construção de coletores e os submeteram à exposição acelerada ao tempo e a níveis de intensidade de radiação UV elevados por um período de até 20 anos.

Outro estudo foi desenvolvido por Kahlen et al. (2010a) com um filme de policarbonato (PC) e envelhecimento a diferentes temperaturas em ar quente e água quente. Os resultados foram satisfatórios quanto à vida útil e à exposição ao tempo na utilização em coberturas de coletores. Atualmente são utilizados para este fim o acrílico, o policarbonato e o



vidro reforçado de poliéster, materiais que possuem boas propriedades óticas. O PVF (fluoreto de polivinila) e o FEP (etileno-propileno fluorado) apresentam melhor transmissividade no espectro da radiação solar. Outros polímeros, tais como GRP (vidro reforçado com plástico) e o PC podem ser estabilizados para evitar a deterioração pela ação da radiação UV, porém este é um processo de alto custo.

Kahlen et al. (2010b) investigaram outros materiais poliméricos quanto à sua aplicabilidade nas placas absorvedoras para coletores solares. O estudo analisou o envelhecimento de plásticos de engenharia, incluindo dois polímeros amorfos, o PPE + PS (Poli fenileno etinileno+Poliestireno) e o PC além de dois outros polímeros semi-cristalinos. O foco da investigação foi o estudo do comportamento do envelhecimento destes materiais em condições máximas de funcionamento (em água a 80 °C e até 16.000 h) e às condições de estagnação (no ar a 140 °C e até 500 h). Ao comparar as duas condições de envelhecimento em ar quente e água quente, chegaram à conclusão que o polipropileno (PP) e o polietileno com formação de rede (PE-X) são candidatos promissores para aplicações em coletores solares.

As altas temperaturas do sistema de aquecimento de água são preocupantes para a maioria dos polímeros, visto que pode haver problemas como fusão, fluência e fragilização do material. Um parâmetro importante para essa análise é a definição de uma temperatura máxima de serviço, chamada índice térmico relativo (RTI). É definida como a temperatura na qual o material perde 50% de suas propriedades mecânicas (resistência ao impacto, tensão ou rigidez) após ser mantido 100.000 horas nessa temperatura. Como exemplo, a RTI do óxido de propileno (PPO) e do propileno (PP), dois materiais utilizados como absorvedores são, respectivamente de 105 °C e 115 °C. As temperaturas de fusão desses materiais são de 280 °C e 193 °C, respectivamente.

Em termos de eficiência do coletor, existe uma grande desvantagem associada à condutividade térmica dos polímeros como absorvedores solares. Os valores de condutividade térmica dos polímeros variam entre 0,1 a 0,5 W/mK. Já para os metais tradicionalmente utilizados como coletores, alumínio e cobre, esses valores estão na faixa de 200 a 380 W/mK. Pode-se melhorar a eficiência dos polímeros no que se refere à condutividade térmica através do design (espessura de parede fina, superfície, etc.) ou materiais modificados (aditivos que aumentam a condutividade térmica), mas esta questão ainda é um desafio tecnologicamente difícil (KÖHL et al., 2005).

3 Simulação e construção do coletor solar polimérico

Para a simulação do coletor solar utilizou-se o modelo de Hottel-Whillier-Bliss, descrito por Duffie e Beckman (2006), considerando a operação em regime permanente. Esse modelo foi implementado por Silva (2012) na plataforma EES (Engineering Equation Solver) baseado no trabalho de Koo (2010). Foram efetuados alguns ajustes, principalmente em relação às propriedades óticas dos materiais de cobertura e da geometria dos canais dos coletores. As geometrias estudadas são baseadas em uma estrutura de canal retangular de pequena altura, visando melhorar o contato entre o fluido de trabalho e o material da placa absorvedora. As quatro configurações estudadas são descritas na Tab. 1.

Tabela 1 – Geometrias dos coletores para simulação

Variáveis de entrada	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Altura interna do tubo, L_{hi} .	0,006 m	0,006 m	0,006 m	0,006 m
Comprimento placa absorvedora, L_{eq}	0,56 m	1 m	1 m	1 m
Largura da placa absorvedora, L_{larg}	0,45m	1 m	1 m	1 m
Número de tubos, N	5	11	5	20
Largura interna do tubo, L_{ci} .	0,085 m	0,085 m	0,196 m	0,045 m



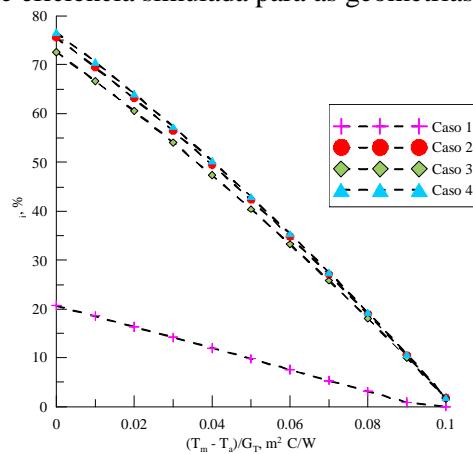
Os parâmetros utilizados para a simulação dos coletores estão descritos na Tab. 2.

Tabela 2 – Parâmetros característicos utilizados na simulação dos coletores solares

Variáveis de entrada	Descrição
Material da placa coletora	PS
Material da cobertura	PC
Absortividade da placa	0,90
Absortividade da cobertura	0,90
Inclinação do coletor	45°
Condutividade térmica do material da placa coletora	0,15 W/(mK)
Distância entre placa absorvedora e cobertura	0,01 m
Emissividade da cobertura	0,85
Emissividade da placa absorvedora	0,90
Espessura do isolamento de base e laterais	0,025 m
Espessura da placa coletora	0,002 m
Espessura da cobertura	0,002 m
Distanciamento entre canais	0,005 m
Taxa de massa por unidade de área	0,02 kg/(sm ²)
Transmissividade da cobertura	0,90

Os casos 2, 3 e 4 referem-se a coletores com áreas convencionais, de 1 m², mudando apenas as dimensões dos canais enquanto o caso 1 refere-se à simulação de um coletor com área aproximada de 0,25 m², que será utilizado como protótipo. Os resultados obtidos na simulação, em termos de eficiência pela temperatura reduzida (escala da abscissa do gráfico) são mostrados na Fig. 1.

Figura 1 – Curva de eficiência simulada para as geometrias de coletores solares



Em coletores solares poliméricos, o rendimento é inversamente proporcional à dimensão da aleta, já que estes materiais não possuem uma boa condutividade térmica. Assim, quanto maior a área de contato entre fluido de trabalho e a placa absorvedora, maior é a transferência de calor. O espaçamento utilizado entre os canais nesta simulação foi de 5 mm, considerando que é necessário uma área mínima para fixação entre as partes superior e inferior do coletor a fim de que este suporte a pressão de trabalho do sistema.

O protótipo de coletor solar polimérico foi construído utilizando-se o processo de termomoldagem, realizando-se separadamente a fabricação da parte inferior e a superior. Estas duas partes foram unidades através de soldagem. A caixa de suporte do coletor também foi realizada com o mesmo material, utilizando o mesmo processo de fabricação. Como cobertura utilizou-se o policarbonado, com espessura da chapa de 2 mm. Uma vista superior do coletor é mostrada na Fig. 2.



Figura 2 – Vista superior do protótipo de coletor solar plano polimérico



4 Resultados do ensaio de desempenho térmico do coletor

A norma utilizada no Brasil e seguida nesse trabalho para a determinação do desempenho térmico de coletores solares planos é a ABNT NBR 15747-2 (2009). Para a realização destes ensaios foi construída uma bancada experimental, mostrada na Fig. 3, utilizando os equipamentos de medição descritos na Tab. 3.

Figura 3 – Vista superior do protótipo de coletor solar plano polimérico



Tabela 3 – Dispositivos de medição utilizados na bancada de testes de coletores solares

Equipamento	Descrição técnica	Descrição
Piranômetro	EPPLEY Modelo PSP	1
Bomba	Texius, modelo TBHX-BR	2
Medidor de vazão	YOKOGAWA, Eletromagnético	3
Suporte coletor	Tubo aço AISI 1020 pintado	4
Reservatório	Komeco 200 L com resistência elétrica interna de 3.000 W	5
Acessórios	Mangueiras/abraçadeiras/engates rápidos	6
Quadro elétrico	Acionamento da bomba e do medidor de vazão	7
Sensores de temperatura	Tipo PT 100	8

Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados na Fig. 4. A máxima eficiência do protótipo do coletor, η_o , foi de aproximadamente 45%, representando suas perdas óticas. Esse valor é aproximadamente igual ao produto $F_R(\tau\alpha)$. O coeficiente de perdas térmicas, $F_R U_L$, calculado para o coletor é de 3,2 ($^{\circ}\text{Cm}^2$)/W, que representa a inclinação da reta mostrada na Fig. 4, obtida a partir da regressão linear dos pontos experimentais.

Quando esses resultados são comparados com os obtidos pela simulação computacional, mostrados na Fig. 1, notam-se algumas diferenças. Para os coletores simulados, os valores de perdas óticas, η_o , ficam em torno de 75% enquanto os coeficientes de perdas térmicas, $F_R U_L$, ficam em torno de 7,1 ($^{\circ}\text{Cm}^2$)/W.

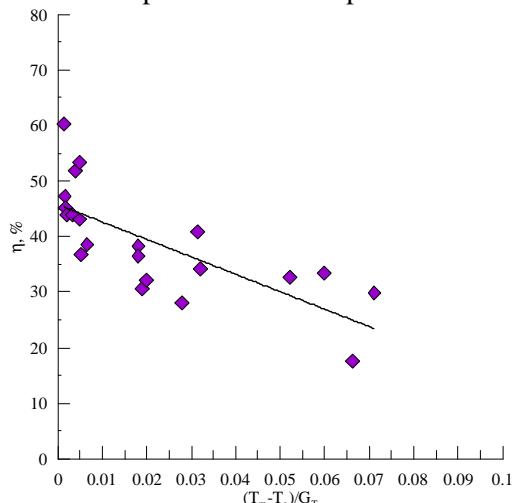
Em relação às perdas óticas, o modelo usado na simulação utiliza valores médios das propriedades do material da cobertura, nesse caso o policarbonato, desconsiderando o caráter espectral destes parâmetros.



O protótipo de coletor ensaiado possui área da superfície absorvedora inferior à área do coletor utilizado na simulação, de aproximadamente 1/4 ($0,252\text{ m}^2$ contra 1 m^2), conforme mencionado anteriormente. Além disso, o comprimento do protótipo foi de aproximadamente 50% do comprimento do coletor simulado, o que afeta a distribuição de temperatura do fluido ao longo do comprimento e na temperatura de saída do coletor, diminuindo a temperatura média da placa absorvedora e, como consequência, diminuindo a taxa de transferência de calor para o meio (perdas térmicas).

Os resultados obtidos durante os ensaios mostram que o desempenho térmico apresentado pelo protótipo de coletor solar polimérico é satisfatório para a finalidade desejada. Aumentando a área da superfície absorvedora e, principalmente, aumentando o comprimento do coletor, seu desempenho térmico deve ficar próximo de um coletor solar convencional. Os resultados obtidos também mostram que o desenho de novas geometrias para os canais de escoamento e a diminuição da largura das aletas entre os canais, minimiza significativamente a desvantagem da baixa condutividade térmica apresentada pelos materiais poliméricos.

Figura 4 – Curva de desempenho térmico experimental do coletor



5 Conclusões

Neste trabalho foram apresentadas a simulação, projeto, construção e testes de um protótipo de coletor solar plano utilizando material polimérico. O objetivo do estudo foi verificar a viabilidade da utilização desse conceito de coletor na aplicação do aquecimento de água para substituição de chuveiros elétricos com a finalidade de beneficiar famílias de baixa renda no Brasil.

Os ensaios realizados com o protótipo mostraram resultados promissores em relação ao desempenho térmico do coletor, mesmo tendo uma área de superfície absorvedora bastante inferior aos coletores convencionais. Estima-se que com o aumento da área da superfície absorvedora, bem como o aumento do comprimento do coletor será possível atingir rendimentos similares aos de coletores solares existentes no mercado.

Um dos importantes resultados obtidos com a realização desse estudo é que o desenho de novas geometrias para os canais de escoamento, bem como a diminuição da largura das aletas entre os canais, contribui para a minimização da desvantagem que materiais poliméricos apresentam em relação à sua baixa condutividade térmica.



Referências

ABNT, NBR 15747-2: **Sistemas solares térmicos e seus componentes – Coletores solares. Parte 2: Métodos de Ensaio.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

ADDEO, A.; CAMPANILE, G.; NICOLAIS, L.; ROMEO, G. *Plastic solar collectors for 'low energy' applications*. **Applied Energy**, v. 6, n. 4, 1980, pg. 265-274.

ANEEL, **Estrutura Tarifária Para o Serviço de Distribuição de Energia Elétrica.** Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2010.

BLAGA, A. Use of plastics in solar energy applications. **Solar Energy**, v. 21, n. 4, 1978, pg. 331-338.

DUFFIE, J., A.; BECKMAN, W., A. **Solar Engineering of Thermal Process.** 3ed. New Jersey: John Wiley, 2006.

EDLIN, F.E. Plastic glazings for solar energy absorption collectors. **Solar Energy**, v. 2, n. 2, 1958, pg. 3-6.

JORGENSEN, G.; TERWILLIGER, K.; BINGHAM, C.; MILBOURNE, M. Durability of polymeric glazing materials for solar applications. National Renewable Energy Laboratory, **NREL/CP-520-34702**, 2003, 15p.

KAHLEN, S.; WALLNER, G.M.; LANG, R.W. Aging behavior of polymeric solar absorber materials. Part 1: engineering plastics. **Solar Energy**, v. 84, n. 9, 2010a, pg. 1567-1576.

KAHLEN, S.; WALLNER, G.M.; LANG, R.W. Aging behavior of polymeric solar absorber materials. Part 2: commodity plastics. **Solar Energy**, v. 84, n. 9, 2010b, pg. 1577-1586.

KÖHL, M.; JORGENSEN, G.; BRUNOLD, S.; CARLSSON, B.; HECK, M.; MÖLLER, K. Durability of polymeric glazing materials for solar applications. **Solar Energy**, v. 79, 2005, pg. 618-623.

PROCEL. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso.** Rio de Janeiro: Programa Nacional de Conservação de energia elétrica, 2010.

SILVA, D. **Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para dimensionamento de coletores solares de placa plana.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2012.

TABOR, H., Solar Collectors Selective Surfaces and Heat Engines. National Academy of Sciences Symposium. In: **Proceedings of the N.A.S.**, v. 47, 1961, pg. 1271-1278.

VAN NIEKERK, W.M.K. Performance modelling of a parallel tube polymer absorber. **Solar Energy**, v. 58, n. 1-3, 1996, pg. 39-44.