

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA PROJETO DE COLETOR SOLAR DE PLACA PLANA

Daniel dos Santos Silva – danielsilva441@gmail.com

Mario H. Macagnan – mhmac@unisinus.br

Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Resumo. O objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para projeto e análise de coletores solares de placa plana, baseado na solução de equações analíticas que descrevem a distribuição de temperatura no coletor e que seguem a metodologia originalmente proposta por Hottel e Whillier. A ferramenta desenvolvida permitirá a análise do efeito dos diversos parâmetros construtivos do coletor (diâmetro dos tubos e espaçamento, espaçamento absorvedor-cobertura, material dos tubos, material do absorvedor e espessuras, material da cobertura e espessuras de isolamento) no seu desempenho térmico. São apresentados alguns resultados obtidos pelo programa, como sua validação em relação a dados medidos em um coletor real, e resultados estimados do desempenho térmico de coletores construídos com diferentes materiais.

Palavras-chave: Energia Solar, Coletor Solar Plano, Desempenho Térmico.

1. INTRODUÇÃO

A utilização da energia solar térmica para aquecimento de água de uso doméstico representa um mercado mundial com crescimento em torno de 25% ao ano. No Brasil o crescimento também é elevado, principalmente devido aos programas habitacionais patrocinados pelo governo federal, além dos apelos cada vez mais fortes no sentido de buscar-se uma sustentabilidade energética e de economia através da diminuição do consumo de eletricidade e gás. O crescimento estimado em nosso país é da ordem de 10% ao ano.

Um sistema de aquecimento de água com energia solar é composto basicamente pelos coletores e reservatório térmico, eventualmente bomba e sistemas de controle. Os dois primeiros componentes representam quase a integralidade do valor da instalação, muito em função dos materiais utilizados (cobre, alumínio e aço inoxidável) e dos processos de fabricação utilizados. De acordo com Kohl et al. (2005), os custos de equipamentos e instalação deveriam sofrer uma redução de 50% para possibilitar uma efetiva penetração dessa tecnologia, principalmente quando o objetivo é atender aos programas e usuários de habitações de interesse social. Uma das formas para atender esse objetivo é a utilização de outros materiais para a confecção tanto dos coletores quanto dos reservatórios, como polímeros, por exemplo, e/ou novos processos de fabricação, que permitam diminuir não só os custos finais dos equipamentos, mas também diminuir o seu peso, reduzindo os custos de transporte e instalação.

Independente dos materiais utilizados e seus processos de fabricação, os coletores e os demais equipamentos deverão apresentar desempenho térmico satisfatório, assim como apresentar ao longo de sua vida útil uma durabilidade compatível ao investimento inicial realizado.

Para analisar esse problema, esse trabalho apresentará o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para projeto de coletores solares e alguns resultados obtidos. Através da simulação, a influência dos parâmetros construtivos (diâmetro dos tubos e espaçamento, espaçamento absorvedor-cobertura, material dos tubos, material do absorvedor e espessuras, material da cobertura e espessuras de isolamento) será analisada juntamente com o desempenho térmico do coletor que também será comparado com resultados experimentais obtidos a partir de coletores tradicionais. Da mesma forma as temperaturas máximas de operação na condição de estagnação serão calculadas e deverão fornecer indicadores da viabilidade do uso de determinados materiais.

A ferramenta computacional foi desenvolvida sobre a plataforma EES (Engineering Equation Solver), pela sua facilidade de implementação, disponibilidade de funções de propriedades térmicas de fluidos, materiais e de escoamento.

2. O DESEMPENHO TÉRMICO DOS COLETORES SOLARES DE PLACA PLANA

A análise detalhada de um coletor solar, principalmente a distribuição de temperatura nos tubos e absorvedor, é um problema térmico complexo. Para facilitar, foram desenvolvidos procedimentos mais simples que permitem a análise do desempenho térmico do coletor e a influência dos diversos parâmetros de projeto que conduzem a resultados extremamente satisfatórios. Essa metodologia, desenvolvida principalmente por Whillier (1977) e Hottel e Whillier (1958) e posteriormente aprimorada por Duffie e Beckman (2006), entre outros, tem sido extensivamente testada e

validada com resultados experimentais, sendo então aplicada nesse trabalho. Além disso, rotinas de cálculo de absorção de energia e trocas de calor entre placa e cobertura seguem o modelo apresentado por Koo (1999).

2.1 Coletor Solar Plano

Um exemplo de coletor solar de placa plana com seus componentes é apresentado na Fig. 1. O coletor pode ser dividido em três partes principais: uma cobertura de material transparente cujo objetivo básico é reduzir as perdas de energia por radiação e convecção, uma superfície absorvedora, capaz de absorver a maior parte da radiação solar recebida transferindo-a para o fluido de trabalho que circula em tubos ou outra geometria adequada. A terceira parte é a isolamento térmica que visa reduzir as perdas térmicas pela base e laterais do coletor.

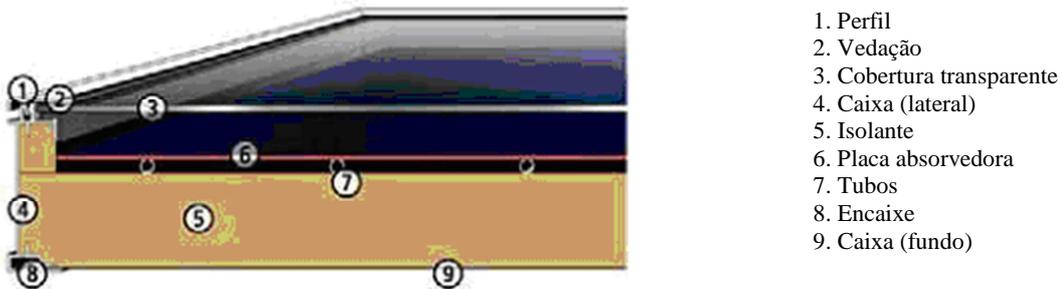


Figura 1- Esquema de um coletor solar plano e suas partes.

2.2 Modelamento do coletor solar

Para o modelamento do coletor foram consideradas algumas hipóteses simplificadoras:

- Coletor operando em regime permanente;
- Gradientes de temperatura através da cobertura, dos tubos e placa absorvedora são desprezíveis e independentes do material utilizado;
- Fluxo de calor unidimensional através da cobertura e isolamento (lateral e posterior).

O desempenho térmico de um coletor solar é descrito, em regime permanente, pelo ganho de calor útil, Q_u , definido como a diferença entre a radiação solar absorvida e as perdas térmicas, conforme a Eq. (1):

$$Q_u = A_p [S - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (1)$$

onde A_p é a área de abertura; S é a radiação solar absorvida pelo coletor, por unidade de área; U_L é o coeficiente de transferência de calor; T_{pm} é a temperatura média do absorvedor e T_a é a temperatura ambiente. A energia solar absorvida pela placa absorvedora do coletor, considerando o modelo de céu isotrópico, é dada pela Eq. (2):

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + (I_b + I_d) (\tau\alpha)_g \rho_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (2)$$

onde I é a intensidade da radiação e os subscritos b , d e g referem-se às componentes direta, difusa e refletida pelo solo, respectivamente; $(\tau\alpha)$ é o produto transmitância-absortância, que representa a absorptância efetiva do sistema cobertura-placa absorvedora; β é a inclinação do coletor e ρ_g é refletância difusa pelo solo. Nessa equação o fator R_b é a razão da radiação total incidente sobre um plano inclinado em relação ao plano horizontal.

As propriedades óticas da cobertura, transmitância, τ , refletância, ρ , e absorptância, α , são calculadas em função do número de coberturas do coletor. Para um coletor com apenas uma cobertura, essas propriedades são calculadas pela Eq. (3):

$$\tau = \frac{\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}}{2}; \rho = \frac{\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}}{2}; \alpha = \frac{\alpha_{\perp} + \alpha_{\parallel}}{2} \quad (3)$$

onde os subíndices \perp e \parallel representam as componentes não polarizadas da radiação incidente, cujos cálculos podem ser obtidos em Duffie e Beckman (2006), por exemplo.

Essas propriedades podem ser calculadas utilizando-se equações simplificadas cujos resultados estão muito próximos dos obtidos pela solução das Eq. (3). A transmitância pode ser calculada através da Eq. (4):

$$\tau \cong \tau_a \tau_r \quad (4)$$

onde τ_a é fração da radiação incidente absorvida pela cobertura e τ_r é a transmitância considerando apenas as perdas por reflexão. A absorção da radiação incidente por uma cobertura parcialmente transparente é dada pela Eq. (5):

$$\tau_a = \exp\left(-\frac{KL}{\cos\theta_2}\right) \quad (5)$$

onde K é o coeficiente de extinção, L a espessura do meio e θ_2 é o ângulo de refração. A transmitância, considerando as perdas por reflexão, é determinada pelas Eq. (6a e b) e (3):

$$\tau_{r\perp} = \tau_a \frac{(1 - r_{\perp})}{(1 + r_{\perp})} \quad (6a)$$

$$\tau_{r\parallel} = \tau_a \frac{(1 - r_{\parallel})}{(1 + r_{\parallel})} \quad (6b)$$

onde os termos relativos à reflexão, r , podem ser encontrados através da Lei de Fresnel.

A absorptância pode ser calculada pela Eq. (7):

$$\alpha \cong 1 - \tau_a \quad (7)$$

e a refletância pela Eq. (8):

$$\rho \cong \tau_a(1 - \tau_r) = \tau_a - \tau_r \quad (8)$$

Dessa forma, o produto transmitância-absortância ($\tau\alpha$) pode ser calculado pela Eq. (9):

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \quad (9)$$

onde ρ_d representa a refletância difusa da cobertura. A análise anterior é válida somente para a componente direta da radiação solar. No entanto, a transmitância da cobertura para as componentes difusa e refletida pode ser calculada utilizando-se o conceito de ângulos de incidência equivalentes. Segundo Brandemuehl e Beckman (1980), a Eq. (10) representa a equivalência angular da radiação difusa e a Eq. (11) a equivalência angular da radiação do solo e assim obtém-se os componentes perpendicular e paralelo da radiação não polarizada.

$$\theta_{i,d} = 59,7 - 0,1388\beta + 0,001497\beta^2 \quad (10)$$

$$\theta_{i,g} = 90 - 0,5788\beta + 0,002693\beta^2 \quad (11)$$

onde β é o ângulo de inclinação do coletor. A energia solar absorvida pela placa absorvedora é dividida em duas componentes: parte dessa energia é transformada em calor útil para o fluido de trabalho e parte é perdida através do topo, do fundo e das laterais do coletor solar. Se as perdas térmicas, Q_L , forem baseadas na temperatura média da placa absorvedora, T_{pm} , então poderão ser calculadas pela Eq. (12) como:

$$Q_L = U_L A_c (T_{pm} - T_a) \quad (12)$$

As perdas térmicas são representadas pela soma das perdas pelo topo, fundo e laterais do coletor, conforme representadas pela Eq. (13):

$$Q_L = Q_t + Q_b + Q_e \quad (13)$$

As perdas pela cobertura se devem aos mecanismos de transferência de calor por convecção e radiação entre placas paralelas e entre a placa absorvedora e o céu bem como pela transferência de calor por convecção devido o efeito do vento sobre a cobertura do coletor. As trocas térmicas pelo efeito da radiação entre placas são resolvidas pelo método da *radiação líquida*, conforme Siegel e Howell (1992). As demais taxas são calculadas a partir de equações disponíveis na literatura, resolvendo assim uma malha contendo as resistências térmicas de cada processo. Para fins de cálculo, é interessante desenvolver o conceito de um coeficiente global de perdas térmicas, U_L , conforme Eq. (14):

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (14)$$

onde o coeficiente de perda global líquida, U_L , é a soma dos coeficientes de perdas pelo topo, U_t , base, U_b e laterais, U_e . A complexa análise de distribuição de temperatura na placa absorvedora, solda entre tubo e placa, transferência de calor interna nos tubos e a geometria do coletor remete ao conceito de *Fator de Eficiência* do coletor, F' e o *Fator de Remoção de Calor* do coletor (F_R), representados pelas Eq. (15) e (16), respectivamente:

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (15)$$

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c U_L F'}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (16)$$

Nessas equações, W é o espaçamento entre os centros dos tubos, D é o diâmetro externo do tubo, D_i o diâmetro interno, F é a eficiência da aleta, C_b é a condutância da solda entre tubo e placa, \dot{m} é a taxa de massa do fluido circulando pelos tubos e C_p é o calor específico do fluido de trabalho. O fator F' representa a relação entre o ganho de energia útil real em relação ao ganho de calor que resultaria se a placa absorvedora estivesse na temperatura do fluido local. O fator F_R representa o ganho de calor útil real do coletor em relação ao ganho útil se toda a superfície do coletor estivesse na temperatura de entrada do fluido. Na prática, esse fator é equivalente à efetividade de um trocador de calor convencional. Dessa forma, o calor útil do coletor pode ser representado pela Eq. (17):

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (17)$$

onde T_i é a temperatura de entrada do fluido no coletor solar.

A eficiência térmica de um coletor pode então ser calculada pela Eq. (18):

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G_T} = \left[F_R (\tau \alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{G_T} \right] \quad (18)$$

onde G_T é a radiação solar incidente na superfície do coletor solar. Essa definição de eficiência está normatizada pela NBR 15747-2/2009 assim como em várias normas internacionais para testes de coletores solares de placa plana.

Outro fator importante no projeto de placas planas é a determinação da temperatura de estagnação, T_{max} , do sistema. Esta informação é vital principalmente no projeto de coletores solares poliméricos, pois a temperatura não pode ser superior a máxima temperatura admissível pelos materiais sob pena de causar danos irreversíveis a placa. 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. Um método simples para cálculo desta temperatura está expresso na Eq. (19):

$$T_{max} = T_a + \frac{S}{U_L} \quad (19)$$

2.3 Validação do modelo matemático

Com o objetivo de validar a metodologia de cálculo empregada foram utilizados dados experimentais de três coletores solares comerciais. Os dados usados correspondem ao teste de um coletor solar, modelo S-Class, fabricado pela RM-Solar, realizado pelo *Test Center for Thermal Solar Systems* do *Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme* (2006), da Alemanha. O coletor testado possui tubos de cobre com placa absorvedora de alumínio e cobertura de vidro. O coletor Ksole, testado pelo *Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik* (ITW, 2002a), é fabricado com tubos de alumínio e placa absorvedora de cobre e cobertura de vidro. O coletor Solares, fabricado pela Kobrasol de Santa Catarina, possui placa absorvedora e tubos de cobre, com uma cobertura de vidro. Esse coletor também foi testado pelo *Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik* (ITW, 2002b). As especificações construtivas de todos os coletores utilizados na comparação estão apresentadas na Tab. 1 e os dados de teste são mostrados na Tab. 2 e nas Fig. 2 a 4.

Tabela 1. Especificações dos coletores analisados. As dimensões estão em mm.

Coletor	Número de tubos	D	D _i	Comprimento	Largura	Espessura da cobertura de vidro	Espessura da placa
S-Class	21	10	8,6	2008	1010	4	0,4
Ksole	9	8	6,6	2007	1008	3,2	0,22
Solares	8	15	14,2	1415	1014	4	0,2

Tabela 2. Resultados experimentais do coletor solar S-CLASS.

T_i , °C	T_o , °C	ΔT , °C	T_m , °C	T_a , °C	$\Delta T/G_T$, °Cm ² /W	η_i
23,04	32,94	9,90	27,99	29,58	-0,0016	82,2
23,05	32,95	9,90	28	29,72	-0,0017	82,2
23,05	32,96	9,91	28	29,72	-0,0018	82,3
46,16	54,38	8,22	50,27	30,00	0,0211	70,2
46,18	54,42	8,24	50,3	29,97	0,0208	70,3
46,20	54,45	8,25	50,32	29,98	0,0209	70,4
69,29	75,85	6,56	72,57	30,75	0,0429	56,7
69,30	75,87	6,56	72,58	30,73	0,0429	56,7
69,32	75,88	6,56	72,6	30,71	0,0429	56,7
92,14	96,99	4,85	94,56	30,94	0,0652	41,3
92,16	97,01	4,86	94,59	31,1	0,0651	41,3
92,18	97,04	4,86	94,61	31,12	0,0651	41,3

Obs.: T_o é a temperatura de saída e ΔT é a diferença entre T_o e T_i .

Com os dados dos materiais empregados para construção do coletor, geometria e condições de teste (radiação incidente e temperatura ambiente) utiliza-se o programa desenvolvido para calcular o desempenho térmico desse coletor. Os resultados obtidos são apresentados na Tab. 3 para o coletor S-Class.

Tabela 3. Resultados da simulação para o caso do coletor solar S-Class.

T_i , °C	T_o , °C	ΔT , °C	T_m , °C	T_a , °C	$\Delta T/G_T$, °Cm ² /W	η_i
23,04	32,39	9,354	27,72	29,58	-0,001911	78,83
23,05	32,41	9,358	27,73	29,64	-0,00196	78,66
23,05	32,41	9,363	27,73	29,72	-0,00204	78,91
46,16	54,08	7,924	50,12	29,72	0,02093	66,75
46,16	54,12	7,940	50,15	29,97	0,0207	66,89
46,20	54,14	7,940	50,17	29,98	0,02071	66,89
69,29	75,74	6,454	72,52	30,75	0,04284	54,46
69,30	75,75	6,452	72,53	30,73	0,04287	54,45
69,32	75,77	6,449	72,54	30,71	0,04291	54,42
92,14	97,00	4,859	94,57	30,94	0,06526	41,21
92,16	97,03	4,869	94,59	31,10	0,06512	41,3
92,18	97,05	4,869	94,61	31,12	0,06512	41,3

Para os três tipos de coletores mostrados na Tab. 1, a absorptância das placas absorvedoras é de 0,95 e as emitâncias são de 0,16 para S-CLASS, 0,04 para o Ksole e 0,86 para o coletor Solares.

As comparações entre os resultados obtidos em testes experimentais e os calculados pelo programa, para os três modelos de coletores são apresentadas nas Fig. 2, 3 e 4.

Para o coletor S-Class, como pode ser observado na Fig. 2, a diferença máxima entre as curvas de eficiência é de aproximadamente 2%, na condição de temperatura de entrada mais baixa, que corresponde nesse caso a 23,04 °C.

Para o caso do coletor solar Ksole, os resultados apresentam maior diferença para a condição de temperatura de entrada do fluido de 65,14 °C. Para esta faixa de temperatura os dados experimentais apontam uma eficiência de 50,4% enquanto que a eficiência calculada foi de 47,67%. Isto representa uma diferença na eficiência deste ponto de 2,73%.

Na Fig. 4 apresentam-se as curvas de eficiência calculada e a experimental para o coletor solar modelo Solares. Os resultados apresentam maior diferença para a condição de menor temperatura de entrada do fluido. Para esta faixa de temperatura os dados experimentais apontam uma eficiência de 69,9% enquanto que o calculado 67,3%. Isto representa uma diferença na eficiência deste ponto de 2,6%.

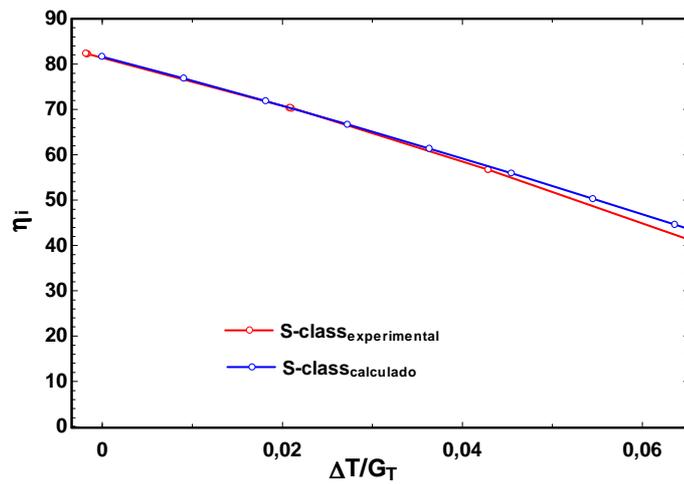


Figura 2 - Curvas de eficiência comparativas entre resultados experimentais e calculados do coletor *S-Class*.

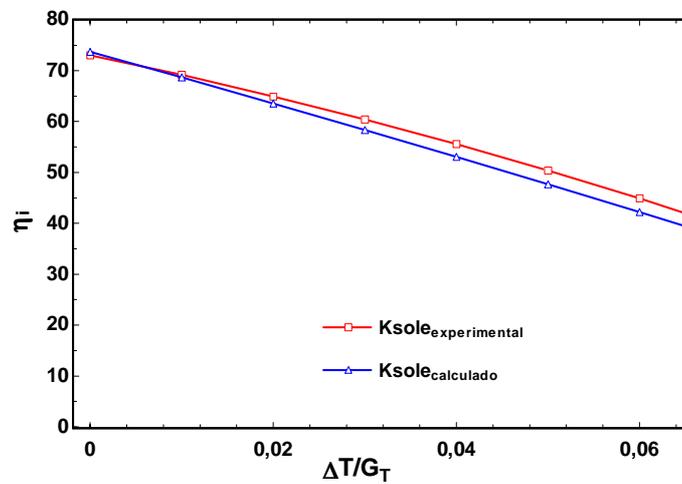


Figura 3 - Curvas de eficiência comparativas entre resultados experimentais e calculados do coletor *K-Sole*.

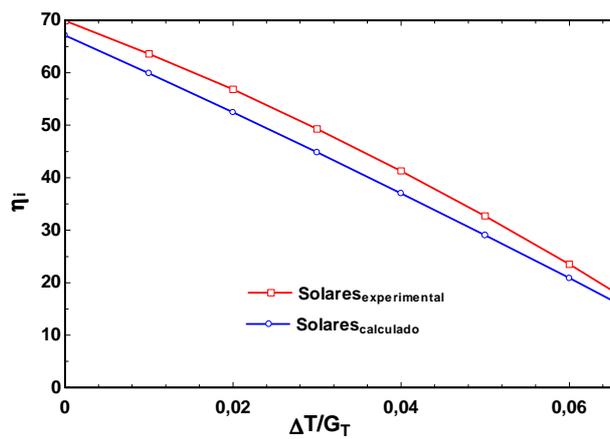


Figura 4 - Curvas de eficiência comparativas entre resultados experimentais e calculados do coletor *Solares*.

Os resultados obtidos pelo programa, utilizando a metodologia apresentada, demonstram sua adequação para estimar o desempenho de coletores solares de placa plana baseado em informações de geometria e materiais utilizados

para sua confecção. Visando extrapolar o uso da ferramenta para outros tipos de coletores, apresenta-se na Fig. 5 o desempenho de um coletor solar utilizando material polimérico (polietileno) para sua fabricação, comparado com um coletor utilizando tubos e placa absorvedora de alumínio, com as mesmas características geométricas apresentadas pelo coletor da Fig. 4.

Nessa figura observa-se um desempenho térmico inferior quando se trata de placas coletoras construídas de polietileno. Para o alumínio foi utilizada a condutividade térmica de 237 W/mK, para o polietileno mais carga de 25% Al 203, a condutividade considerada foi de 1,6 W/mK, para o polietileno de alta densidade uma condutividade igual a 0,52 W/mK e para o polietileno de baixa densidade, condutividade igual a 0,33 W/mK. Com isto conclui-se que o uso de geometrias similares às convencionais para a fabricação de coletores poliméricos não produz bons resultados, principalmente devido às propriedades térmicas do material utilizado. Por outro lado, aumentando o número de tubos do coletor polimérico de forma a ocupar toda a largura original do coletor apresentado na Fig. 4 pode apresentar um resultado satisfatório, conforme demonstrado na Fig. 6. Dessa forma, como os tubos estão justapostos, a eficiência da aleta tende a unidade, aumentando seu desempenho térmico. Esses resultados mostram que é possível projetar um coletor polimérico que apresente um bom desempenho térmico a baixos custos de instalação e manutenção, contrapondo assim o problema da deficiente condutividade térmica dos materiais poliméricos.

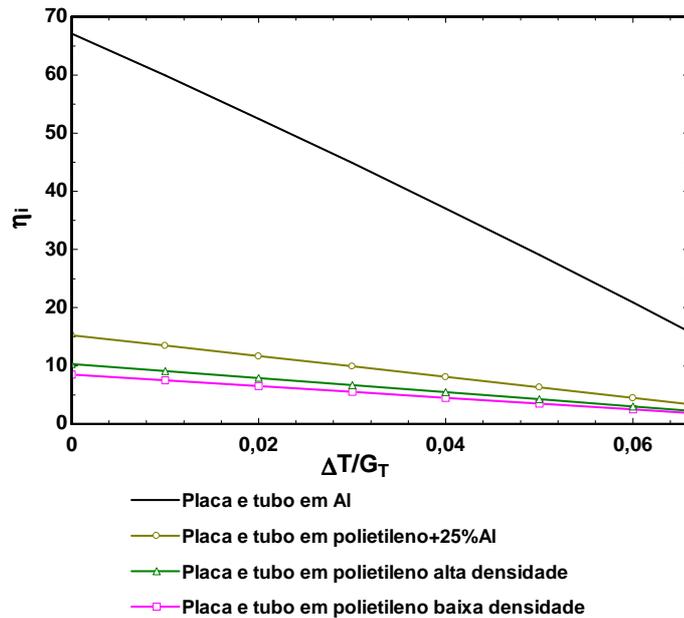


Figura 5 - Curvas de eficiência comparativas entre placas coletoras fabricadas com diferentes tipos de materiais.

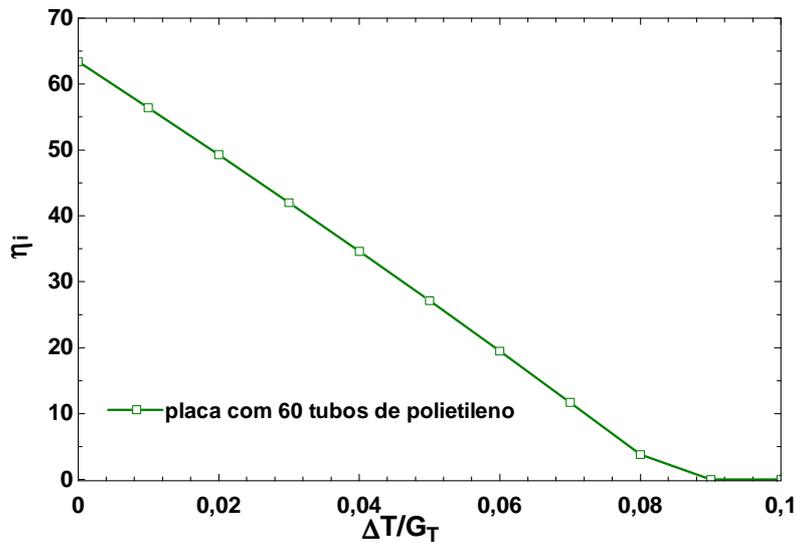


Figura 6 - Curva de eficiência de placa e 60 tubos em polietileno de alta densidade.

3. CONCLUSÕES

Como resultado deste estudo é apresentado o desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de avaliar a eficiência térmica de diferentes configurações de coletores solares de placa plana, em função de suas características geométricas de materiais utilizados na sua fabricação.

Embora existam pequenas diferenças entre os resultados calculados e os valores medidos em testes, a metodologia empregada mostra-se satisfatória para a finalidade proposta. Pela observação das Fig. 2 a 6, pode notar-se que os valores estimados da eficiência dos coletores são lineares com relação à abscissa, ao contrário do que acontece nos testes. Esse efeito surge a partir da adoção no modelo de um coeficiente de transferência de calor, U_L , que é considerado como uma função linear da diferença de temperatura entre a placa absorvedora e o meio. Como as perdas térmicas do coletor são uma combinação de dois processos, convecção e radiação, que são não-lineares (Khoukhi e Maruyama, 2005), os resultados apresentam pequenas diferenças, conforme comentado. No entanto, para fins de dimensionamento e estudo do efeito dos diversos parâmetros de projeto do coletor no seu desempenho térmico, os resultados obtidos mostram-se bastante satisfatórios.

Os resultados também mostram, conforme apresentado na Fig. 5, que a simples substituição dos tubos metálicos do coletor solar por tubos poliméricos resulta em uma queda acentuada do rendimento térmico, inviabilizando o seu uso. Por outro lado, o melhor aproveitamento da área útil com um número maior de tubos ou outra geometria de escoamento, melhora significativamente sua eficiência. Esta ferramenta, que utiliza como base de processamento o EES, torna o projeto e simulação do desempenho térmico de coletores solares de placa plana extremamente simples.

Agradecimentos

Esse trabalho é financiado pela FINEP, convênio 0924/10 e pelo CNPq, através da concessão de uma bolsa DTI para o autor principal do artigo.

REFERÊNCIAS

- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas; NBR 15747-2, 2009. Sistemas Solares Térmicos e seus Componentes - Coletores Solares. Parte 2: Métodos de Ensaio, ABNT, 117p.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 2006. Solar Engineering of Thermal Processes. 3th. ed. John Wiley, Hoboken.
- Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme, 2006. Test Report: KTB Nr. 2003-18-b-en.
- Hottel, H.C., Whillier, A., 1958. Evaluation of flat-plate collector performance. Transactions of the Conference on the use of solar energy. University of Arizona Press, EUA.
- Hottel, H.C., Woertz B.B., 1942. The performance of flat plate solar heat collectors. Trans. Am. Soc. Mech. Engrs. vol. 64, pp. 91-104.
- ITW Institut Für Thermodynamik und Wärmetechnik, 2002a. Test Report 02COL272: Thermal Performance of Solar Collector, Universität Stuttgart, Alemanha.
- ITW Institut Für Thermodynamik und Wärmetechnik, 2002b. Test Report 02COL273: Thermal Performance of Solar Collector, Universität Stuttgart, Alemanha.
- Koo, J.M., 1999. Development of a Flat-Plate Solar Collector Design Program. Dissertação de mestrado. University of Wisconsin-Madison, EUA.
- Siegel, R. Howell, J.R., 1992. Thermal Radiation Heat Transfer. 3th ed. Taylor & Francis, New York.
- Willier, A., 1977. Prediction of performance of solar collectors. In Applications of solar energy for heating and cooling of buildings. ASHRAE, New York.

DEVELOPMENT OF A COMPUTER PROGRAM FOR DESIGN OF FLAT PLATE SOLAR COLLECTOR

Abstract. *This paper discusses the development of a computational tool for design and analysis of flat plate solar collectors, based on the solution of a set of analytical equations that describe the temperature distribution in the collector. This tool will allow the analysis of the effect of different construction parameters of the collector (diameter and tube spacing, spacing between absorber and cover, tube and absorber materials and thickness, cover materials, insulation) in collector thermal performance. Some results obtained by the program are presented, as well as its validation against measured data in a real collector. Also is presented some results about the thermal performance of solar collectors constructed with other materials.*

Keywords: *Solar Energy, Flat-plate collector, Thermal performance.*