

INFLUÊNCIA DE VARIAÇÕES DA ESPESSURA DA PLACA E DA QUANTIDADE DE TUBOS NO FATOR DE EFICIÊNCIA DE COLETORES SOLARES PLANOS PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA

Paulo José Schiavon Ara – pauloara@ipt.br; paulo.ara@usp.br
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica
Daniel Setrak Sowmy – dss@ipt.br; dss@usp.br
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica
Racine Tadeu Araújo Prado – racine.prado@usp.br
Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. No contexto da busca por fontes renováveis de energia, o aproveitamento térmico da energia solar tem sido uma alternativa de crescente interesse. Entretanto, a desaceleração do crescimento do setor solar térmico nos últimos anos e o avanço dos programas de qualidade e certificação de produtos tem impulsionado o desenvolvimento de coletores solares que operem com eficiências térmicas mais elevadas na conversão de radiação solar em calor. Para essa finalidade, o projeto do coletor tem grande relevância, pois define as características construtivas do produto que potencializam a absorção de calor e minimizam as perdas térmicas para o ambiente. Dentre os diversos parâmetros de projeto que influenciam na eficiência térmica do coletor, dois deles são estudados nesse trabalho: a espessura da placa absorvedora e a quantidade de tubos verticais. O fator de eficiência do coletor (F') é utilizado para analisar a importância relativa desses parâmetros e modelos algébricos extraídos da literatura são utilizados para cálculo de F' em um coletor solar plano de características previamente conhecidas. Os resultados mostraram significativa influência da espessura e da quantidade de tubos no fator de eficiência do coletor, sendo que o efeito do aumento de espessura é, em termos percentuais, menos importante do que o efeito do aumento da quantidade de tubos. Constatou-se que esse comportamento praticamente independe do coeficiente global de perda de calor do coletor. Além disso, os resultados mostraram que a influência de variações na espessura no fator de eficiência diminui com a redução do espaçamento entre tubos. Adicionalmente, mostrou-se que a sensibilidade do fator de eficiência do coletor às variações de espessura e quantidade de tubos aumenta com a melhora do isolamento térmico do coletor, enquanto que para coletores com elevados coeficientes globais de perda de calor, variações dos dois parâmetros pouco influenciam o fator de eficiência.

Palavras-chave: Fator de Eficiência do coletor solar, espessura da placa, quantidade de tubos

1. INTRODUÇÃO

No contexto de crescimento da participação das fontes renováveis de energia na matriz energética global (*Institute for Energy Economics and Financial Analysis*, 2016), a utilização do recurso solar como fonte de energia para aquecimento de água tem um importante papel. Na Europa, por exemplo, ao final de 2015, os sistemas de aquecimento solar de água atingiram 33,3 GWth de capacidade instalada e 47,5 milhões de metros quadrados de área coletora, representando um crescimento de 4,4% em relação ao final do ano anterior (*European Solar Thermal Industry Federation*, 2016). Apesar do crescimento, observa-se uma desaceleração nos últimos anos. Na Europa, em 2008 foram instalados cerca de 5 milhões de metros quadrados de coletores fechados planos, ou seja, excluindo-se aquecedores solares de piscinas, enquanto que em 2015 as novas instalações somaram menos de 3 milhões de metros quadrados às instalações já existentes (*European Solar Thermal Industry Federation*, 2016).

A nível global, assim como na Europa, observa-se o crescimento do setor solar térmico, de tal forma que a capacidade instalada de sistemas de aquecimento solar cresceu aproximadamente 600% de 2000 a 2015 (Mauthner *et al.*, 2016). Esse crescimento, porém, ocorre a taxas cada vez menores. Em 2014, por exemplo, os novos sistemas de aquecimento solar somaram uma capacidade instalada 15,2% menor do que a produzida pela instalação de novos sistemas em 2013 (Mauthner *et al.*, 2016).

Dado esse cenário, a expansão do setor solar térmico passa a depender cada vez mais fortemente da qualidade dos coletores solares e de sua eficiência térmica, que refletem diretamente na atratividade da tecnologia, de forma que se torne competitiva em comparação com as fontes convencionais de energia. Da mesma forma, a eficiência térmica dos coletores tem se tornado um fator crucial para fabricantes e projetistas dado a presença crescente de mecanismos de certificação e etiquetagem, que influenciam indiretamente a indústria no desenvolvimento de produtos mais competitivos. Com esse objetivo, diversas inovações tecnológicas em coletores solares têm sido propostas e estão sendo crescentemente utilizadas em aplicações térmicas (Prado e Sowmy, 2016).

Adicionalmente às novas tecnologias, é de grande relevância trabalhar no aprimoramento do projeto do coletor, de forma a maximizar o aproveitamento térmico da energia solar incidente. O coletor solar possui diversos parâmetros de projeto – características dimensionais, materiais dos componentes, formas construtivas – que tem relação direta com sua eficiência. A definição adequada desses parâmetros pode tornar o coletor significativamente mais eficiente no processo de conversão da radiação solar em energia térmica.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Coletor Solar

O coletor solar pode ser considerado um trocador de calor que transforma radiação solar em calor por meio do aquecimento de um fluido de trabalho, que em geral é a água (Duffie e Beckman, 2013). Seu projeto contempla a utilização de uma caixa externa formada por perfis laterais e uma base, coberta na parte superior por um ou mais vidros que permitem a entrada de radiação solar de curto comprimento de onda e bloqueiam a emissão de radiação térmica de baixa frequência proveniente de seus componentes internos. Internamente à caixa, encontra-se a placa absorvedora, que absorve a radiação incidente e transfere o calor para os tubos verticais e para o fluido que circula através da tubulação. Os tubos e a placa absorvedora são dispostos de tal forma a garantir o contato entre eles e proporcionar adequada transferência de calor por condução. Por fim, um material isolante é disposto inferiormente à placa absorvedora (e eventualmente na lateral) para reduzir as perdas térmicas para o exterior do coletor. A Figura 1 mostra um esquema de um coletor solar plano.

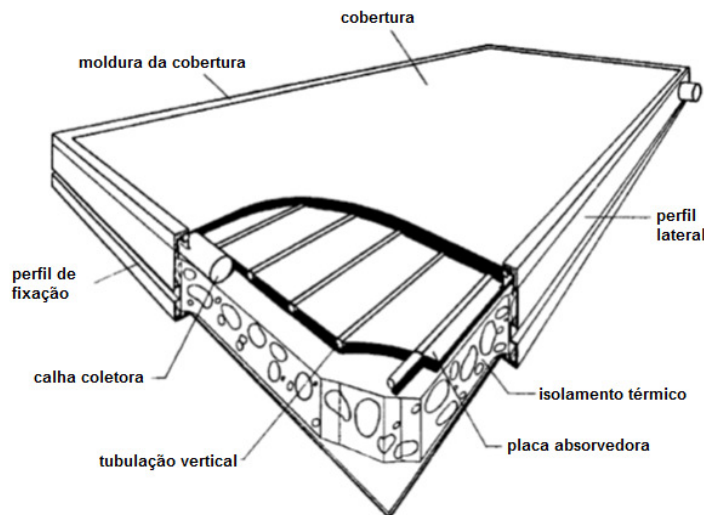


Figura 1- Principais componentes do coletor solar fechado (adaptado de Kalogirou, 2004).

O aproveitamento da energia solar no coletor é influenciado por diversos parâmetros, relacionados ou não ao projeto do produto. Alguns exemplos de parâmetros não relacionados ao projeto são temperatura ambiente, radiação solar global incidente (direta, difusa e refletida), velocidade e direção do ar, latitude e longitude do local de instalação, temperatura de entrada da água, orientação do coletor em relação ao norte geográfico, inclinação do coletor, data do ano e hora, nebulosidade, massa de ar, possíveis sombreamentos, vazão do fluido de trabalho, entre outros.

Por outro lado, exemplos de parâmetros relacionados ao projeto do coletor que influenciam o aproveitamento da energia solar são a configuração geométrica do coletor, fluido de trabalho, dimensões da caixa externa do coletor, moldura do vidro do coletor, áreas do produto (externa, transparente e absorvedora), espessura da placa absorvedora, materiais utilizados e suas propriedades térmicas, tipo de vidro e sua espessura, quantidade de coberturas e propriedades seletivas do vidro, distância entre placa absorvedora e vidro de cobertura, qualidade da montagem, presença de deformações ou danos, manchas no vidro e sua limpeza e vedações.

Ainda relacionados ao projeto, são relevantes a quantidade de tubos verticais e sua geometria, diâmetro interno e externo das tubulações, forma de contato absorvedor e tubulação (encaixe, solda, peça única) e posição relativa entre tubos verticais e absorvedor, área de contato absorvedor e tubulação e condutividade térmica dos contatos, pintura seletiva e tipo de pintura do absorvedor, material, espessura, qualidade e posicionamento do isolante térmico, entre outros.

Dentre os diversos parâmetros citados, dois deles serão estudados nesse trabalho, pois possuem relação forte e direta com a eficiência térmica do coletor: a espessura da placa absorvedora (δ) e a quantidade de tubos verticais (N). A definição da espessura da placa absorvedora tem influência na transferência de calor por condução que ocorre a partir

de qualquer ponto da placa em direção da tubulação vertical. Já a quantidade de tubos verticais interfere na eficiência térmica, pois aumenta ou diminui a quantidade de elementos por onde escoar o fluido que coleta o calor absorvido pela placa. A quantidade de tubos também interfere na temperatura média da placa absorvedora que, por sua vez, está relacionada com a magnitude das perdas térmicas do coletor para o ar ambiente.

A eficiência térmica do coletor (η_T) pode ser aferida experimentalmente. As normas de teste fornecem métodos para sua determinação para diferentes condições de operação, de forma que a eficiência térmica na incidência normal e em regime permanente possa ser representada por uma curva de eficiência instantânea que é função da irradiância solar global no plano do coletor (G), da temperatura ambiente (T_a) e da temperatura do fluido. O método experimental clássico usa como referência a temperatura de entrada da água (ASHRAE 93, 2003). Métodos mais recentes das normas EN 12975-2 (2006), ABNT 15747-2 (2009) e ISO 9806 (2017) se baseiam na temperatura média do fluido. Os testes podem ser realizados em ambiente externo ou interno, neste último caso, utilizando um simulador artificial de radiação solar. Com o simulador é possível o controle mais preciso das variáveis envolvidas tais como temperatura ambiente, velocidade do ar e radiação solar, a fim de melhorar a acurácia dos resultados, de forma que as incertezas combinadas na determinação da eficiência do coletor resultam em valores próximos de 2% (Sowmy *et al.*, 2016).

Além do método experimental, também é possível estimar a eficiência térmica do coletor por modelos de equações algébricas que procuram descrever os processos físicos envolvidos. A potência térmica que pode ser extraída do coletor em regime permanente é representada por:

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

Onde:

A_c : área do coletor (m^2)

Q_u : potência térmica produzida pelo coletor solar (W)

S : energia útil recebida pelo absorvedor (W/m^2)

T_{pm} : temperatura média do absorvedor ($^{\circ}C$)

T_a : temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

Dado que a temperatura T_{pm} é difícil de ser determinada, pode-se substituí-la na Eq. (1) pela temperatura de entrada da água no coletor (T_i), mais fácil de ser aferida, desde que se acrescente na equação o adimensional F_R , menor que 1:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (2)$$

Onde:

A_c : área do coletor (m^2)

F_R : Fator de remoção de calor (adimensional)

Q_u : potência térmica produzida pelo coletor solar (W)

S : energia útil recebida pelo absorvedor (W/m^2)

T_a : temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

T_i : temperatura de entrada da água no coletor ($^{\circ}C$)

U_L : coeficiente global de perda de calor do coletor ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)

Se T_{pm} fosse substituído por T_i sem a inserção de F_R , o resultado de Q_u seria maior que o real, pois a temperatura de entrada é menor que a temperatura da placa absorvedora. Portanto, F_R (<1) é utilizado para corrigir o valor calculado de Q_u . Fisicamente F_R representa a razão entre o ganho real de calor do coletor pelo ganho que o coletor teria se a placa absorvedora estivesse na temperatura de entrada da água. Em outras palavras, representa o ganho real dividido pelo ganho máximo possível para determinada temperatura de entrada de água. F_R é chamado de fator de remoção de calor do coletor.

De forma análoga, é possível modificar a Eq. (1), substituindo T_{pm} pela temperatura local do fluido (T_f) desde que se utilize o fator F' na Eq. (3):

$$Q_u = A_c F' [S - U_L (T_f - T_a)] \quad (3)$$

Onde:

A_c : área do coletor (m^2)

F' : Fator de eficiência do coletor (adimensional)

Q_u : potência térmica produzida pelo coletor solar (W)

S : energia útil recebida pelo absorvedor (W/m^2)

T_a : temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

T_f : temperatura do fluido dentro do coletor ($^{\circ}C$)

U_L : coeficiente global de perda de calor do coletor ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)

Assim, F' representa, em um específico ponto do escoamento no coletor, a razão entre o ganho real de calor pelo ganho que o coletor teria se a placa absorvedora estivesse na temperatura local da água. Embora, a rigor, F' varie de um

ponto a outro do coletor e para diferentes vazões, essa variação é desprezível para os propósitos de análise térmica e pode ser considerado essencialmente constante para cada projeto de coletor e vazão de fluido (Duffie e Beckman, 2013). Outra interpretação de F' é que, para a maior parte de geometrias de coletor, representa a razão entre o coeficiente de transferência de calor entre a placa e o ar, se a placa estivesse na temperatura do fluido (U_g) e coeficiente de transferência de calor real entre a placa e o ar (U_L).

Como T_f é menor que $T_{p,m}$, o fator F' é sempre menor que 1 e como T_i é menor que T_f , o fator F' é sempre maior que F_R . O caso ideal de F' igual a 1 representaria que as temperaturas da placa e do fluido são iguais que é a situação limite de eficácia do trocador de calor. Entretanto, mesmo que F' seja 1 (em uma situação ideal), ainda será maior que F_R , pois a temperatura do fluido é mínima na entrada do coletor e aumenta na direção do escoamento conforme ganha calor. Apenas com vazão muito alta, F_R se aproxima de F' pois o aumento de temperatura do fluido ao percorrer o coletor fluido é menor.

O fator que relaciona F_R e F' , é o fator de escoamento (F^{eff}) da Eq. (4), que é menor que 1 e tende a 1 quando a vazão tende a infinito:

$$F^{eff} = \frac{F_R}{F'} \quad (4)$$

Onde:

F' : Fator de eficiência do coletor (adimensional)

F^{eff} : Fator de escoamento (adimensional)

F_R : Fator de remoção de calor (adimensional)

Para o propósito de analisar o efeito das variações da espessura da placa e da quantidade de tubos na eficiência térmica do coletor, será utilizado o parâmetro F' como indicador do efeito do parâmetro na eficácia da troca de calor entre a placa e o fluido de trabalho.

2.2 Estudos anteriores

Diversos estudos relacionando transferência de calor e parâmetros de projeto do coletor solar vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos. No final da década de 1950, Bliss (1959) desenvolveu uma análise de custo-benefício envolvendo o fator de eficiência do coletor (F') para otimizar a combinação de espessura da placa e espaçamento entre tubos em coletor fechado plano com absorvedor de cobre.

Abdel-Khalik (1976) estudou coletores do tipo serpentina e mostrou-se que para cada combinação de vazão, coeficiente global de perda de calor e área coletora, o fator remoção de calor (F_R) possui um valor limite máximo. Jones (1987) analisou o comportamento do fator de remoção de calor (F_R) em diferentes regimes de escoamento do fluido no coletor e obteve correlações de F_R com a vazão, constatando também a tendência de estabilização de F_R para vazões elevadas.

Ao final da década de 80, Norton *et al.* (1989) estudaram diferentes alternativas para geometria da placa absorvedora e obtiveram para cada uma os respectivos valores de fator remoção de calor (F_R). Valores de F_R próximos de 0,9 foram alcançados para aletas de formato retangular.

Estudos experimentais da década de 90 mostram a forte relação de F' com a distância entre tubos (Ghamari e Worth, 1992) e estudos mais recentes incluem a espessura da placa e o coeficiente global de perda de calor do coletor no conjunto de parâmetros mais influentes no fator de eficiência do coletor (F'), juntamente com a distância entre tubos e a vazão do fluido (Eisenmann *et al.*, 2004). Por fim, é possível encontrar também trabalhos que tratam da combinação ótima entre os parâmetros do coletor e parâmetros de operação do sistema de aquecimento solar (Badescu, 2006).

3. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é analisar o efeito das variações de espessura da placa e da quantidade de tubos no fator de eficiência (F') de um coletor fechado plano de configurações geométricas pré-definidas.

4. MÉTODO

O método a ser utilizado nesse trabalho é descrito nos itens a seguir:

4.1 Escolha do coletor solar

O coletor solar a ser estudado foi definido com base nas configurações típicas utilizadas pelos fabricantes nacionais. A lista dos parâmetros construtivos do coletor é apresentada na Tabela 1:

Tabela 1 - Resumo das características construtivas do coletor solar a ser estudado.

| PARÂMETRO | DESCRIÇÃO |
|------------------------------|---|
| Lateral da caixa externa | Perfil de alumínio extrudado de 1,0 mm de espessura |
| Isolamento térmico | Poliuretano (Coeficiente Global de Perda de calor do coletor = 7,5 W/°Cm ²) |
| Dimensão externa | 1 metro x 1 metro |
| Área transparente | 0,95 m ² |
| Contato tubo e placa | Fator de contato de 5%, solda por ultrassom, tubo sob a placa |
| Tubos verticais | Cobre, comprimento 900 mm, diâmetro externo 10 mm e interno 9 mm |
| Calhas coletoras | Cobre, diâmetro externo 22 mm e interno 20 mm |
| Circuito hidráulico | Calha e Flautas com entrada inferior esquerda e saída superior direita |
| Cobertura | Vidro liso 3 mm |
| Air gap | 25 mm |
| Vedação | Silicone |
| Fluido de trabalho | Água |
| Revestimento da placa | Pintura comercial preto fosco |
| Largura da placa absorvedora | 950 mm |
| Placa absorvedora | Chapa lisa de alumínio |
| Espessura da placa (*) | 0,3 mm |
| Quantidade de tubos (*) | 7 tubos |

(*) Parâmetros estudados no trabalho.

4.2 Cálculo do Fator de Eficiência

O fator de eficiência (F') foi calculado para o coletor descrito na Tabela 1, utilizando o modelo apresentado na literatura (Duffie e Beckman, 2013). As Eq. (5), Eq. (6) e Eq. (7) apresentam o modelo utilizado para estimativa de F' :

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L [D+(W-D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (5)$$

Onde:

C_b : condutância térmica do contato tubo e placa (W/m²°C)

D : diâmetro externo do tubo (m)

D_i : diâmetro interno do tubo (m)

h_{fi} : coeficiente de transferência de calor por convecção interna ao tubo (W/m²°C)

U_L : coeficiente global de perda de calor do coletor (W/m²°C)

W : distância entre tubos (m)

F : Fator de eficiência da aleta (adimensional)

F' : Fator de eficiência do coletor (adimensional)

$$F = \frac{\tanh m(W-D)/2}{m(W-D)/2} \quad (6)$$

Onde:

D : diâmetro externo do tubo (m)

F : Fator de eficiência da aleta (adimensional)

W : distância entre tubos (m)

m : adimensional definido na Eq. (7)

$$m^2 = \frac{U_L}{k\delta} \quad (7)$$

Onde:

k : condutividade térmica da placa absorvedora (W/m°C)

δ : espessura da placa absorvedora (mm)

U_L : coeficiente global de perda de calor do coletor (W/m²°C)

Para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção interno ao tubo (h_{fi}) foi utilizado o equacionamento apresentado pela literatura (Duffie e Beckman, 2013). Nessa abordagem, os números de Prandtl (Pr) e Reynolds (Re) do escoamento são calculados para estimar o número de Nusselt (Nu) e este último é utilizado para o cálculo do coeficiente de convecção (h_{fi}). Como esses parâmetros dependem da temperatura do fluido, os cálculos

foram realizados para algumas temperaturas médias do fluido dentro da faixa de operação do coletor (20°C a 80°C) para as quais os fatores de eficiência (F^f) foram obtidos.

O fator de eficiência para a configuração do coletor foi obtido pela média dos fatores de eficiência (F^f) nas diversas temperaturas. Ressalta-se, porém, que F^f se manteve praticamente constante para as diferentes temperaturas de operação, dada uma mesma configuração construtiva, apresentando variações máximas de 0,3%, que poderiam eventualmente ser desprezadas.

A relação entre a quantidade de tubos (N) e a distância entre tubos (W) foi considerada tal que N correspondesse à razão entre largura da placa absorvedora e W .

Para a realização dos cálculos, foi considerado que o fluido de trabalho é a água, que a vazão do fluido é a definida na referência normativa da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT 15747-2, 2009). Por fim, considerou-se a hipótese que ocorre distribuição homogênea de vazão entre os tubos verticais.

4.3 Simulações das variações de espessura e quantidade de tubos

O método para analisar a influência da espessura da placa e quantidade de tubos no Fator de Eficiência do coletor consistiu na utilização do equacionamento apresentado anteriormente, no qual foram inseridos os parâmetros construtivos apresentados na Tabela 1 e a posterior variação dos valores de espessura da placa (δ) e quantidade de tubos para verificação do efeito em F^f .

5. RESULTADOS

Para o coletor apresentado na Tabela 1, com espessura de 0,3 mm e 7 tubos, o valor calculado de F^f foi 0,858. Os resultados obtidos a seguir correspondem as simulações de variações de espessura e quantidade de tubos. A Figura 2 mostra a variação de F^f em função da quantidade de tubos e da espessura, para o coletor estudado.

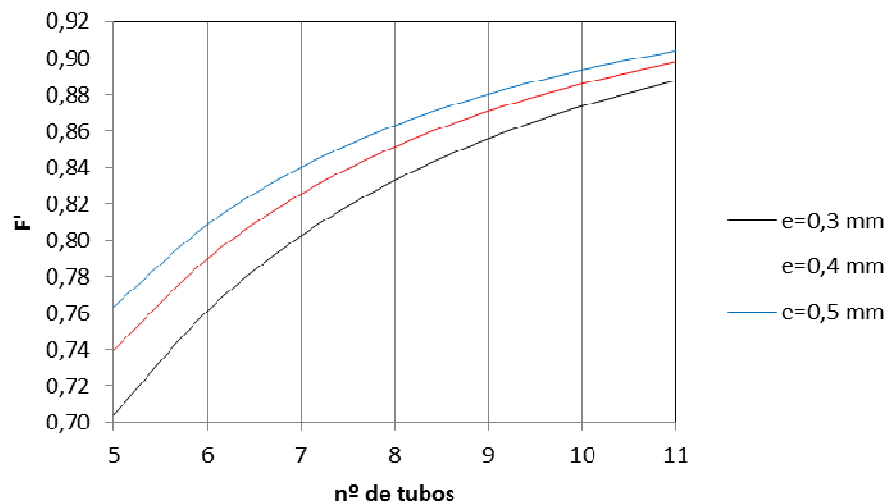


Figura 2- Variação de F^f em função da quantidade de tubos e da espessura

Analisando a Figura 2, pode-se dizer que F^f , como esperado, aumenta com a quantidade de tubos e com a espessura da placa. Um número maior de tubos aumenta a coleta de calor pelo fluido e aproxima a temperatura média do fluido (T_f) da temperatura da placa (T_{pm}), assim, conforme a Eq. (1) e Eq. (3), F^f se aproxima de 1. De forma semelhante, o aumento da espessura da placa aumenta a capacidade de condução de calor de qualquer ponto da placa para a região dos tubos, aumentando o fluxo de calor para a água, aproximando T_f de T_{pm} e elevando F^f .

Nota-se, porém, uma resposta não linear de F^f às variações de espessura e quantidade de tubos. O acréscimo em F^f vai se tornando cada vez menor conforme aumenta a quantidade de tubos, semelhante ao que ocorre quando se aumenta a espessura. Esse comportamento pode ser interpretado em relação ao efeito da placa (ou da aleta) no comportamento térmico do coletor. Para um coletor com poucos tubos, uma variação de espessura na placa pode resultar em um ganho significativo em F^f , ou que não ocorre em um coletor de muitos tubos. Em outras palavras, quanto maior a quantidade de tubos, menor a influência da placa no fator de eficiência.

O Figura 3 mostra um exemplo desse fenômeno. Simulando, no coletor estudado, uma alteração na espessura da placa de 0,3 mm para 0,5 mm, para diferentes configurações de quantidade de tubos, obtêm-se um maior ganho, em pontos percentuais em F^f quanto menor for a quantidade de tubos. Com esse aumento de 0,2 mm na espessura, F^f teria um acréscimo de 5,9% e 1,6% para coletores de 5 e 11 tubos respectivamente. Isto é, para um projetista que trabalha com um coletor com 11 tubos, a estratégia de aumentar a espessura da placa não é tão relevante quanto para um

projetista que trabalha com um coletor com 5 tubos, para o qual o aumento de espessura pode apresentar um benefício significativo para a eficiência térmica.

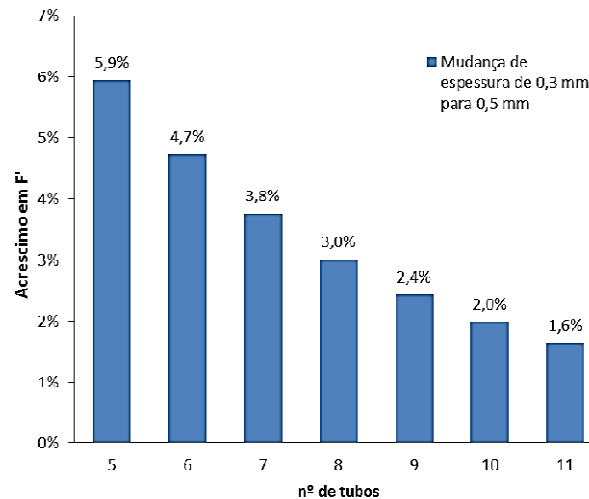


Figura 3- Acréscimo percentual em F' decorrente da mudança de espessura de 0,3mm para 0,5mm

Para prosseguir as análises é conveniente definir, neste trabalho, uma função *espessura equivalente* $\delta_{eq}(x)$ para o coletor em estudo, descrito na Tabela 1. A espessura equivalente $\delta_{eq}(x)$ corresponde à espessura da placa do coletor de N tubos que resulta no mesmo fator de eficiência do coletor de espessura δ e x tubos. Se $x = N$, tem-se que $\delta_{eq}(N) = \delta$, se $x > N$, $\delta_{eq}(x) > \delta$ e se $x < N$, $\delta_{eq}(x) < \delta$. No caso desse trabalho, $N=7$ e $\delta=0,3$ mm, conforme definidos na Tabela 1. Se $\delta_{eq}(x=10)$ for 0,10 mm, por exemplo, tem-se que possuem o mesmo fator de eficiência o coletor de 7 tubos e 0,10 mm e o coletor de 10 tubos e 0,3 mm

A Figura 4 mostra a variação da espessura equivalente δ_{eq} em função da quantidade de tubos para o coletor definido na Tabela 1.

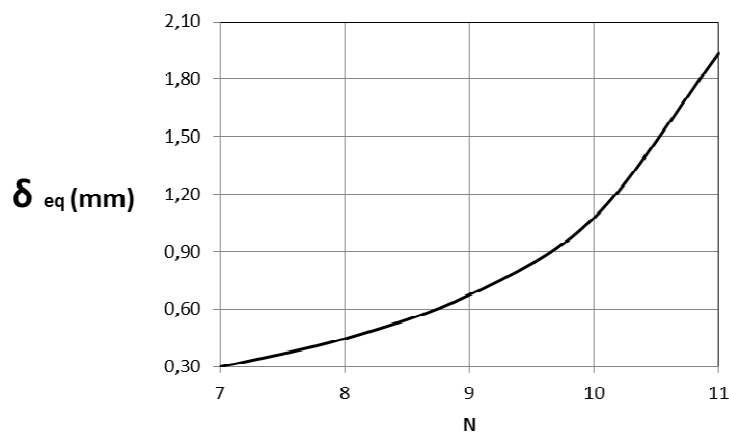


Figura 4- Função espessura equivalente para o coletor estudado

Observando a Figura 4, pode-se notar que o mesmo efeito em F' é obtido por uma variação percentual maior na espessura do que na quantidade de tubos. Se o projetista, para elevar F' , escolher usar mais tubos ao invés de aumentar a espessura da placa, terá que aumentar percentualmente a quantidade de tubos do que teria que aumentar a espessura, para obter o mesmo efeito no fator de eficiência. Por exemplo, um aumento de 50% na quantidade de tubos seria equivalente, em termos de F' , a aumentar cerca de 4 vezes a espessura da placa. Para o caso estudado, aumentar o número de tubos é mais eficaz do ponto de vista térmico, sem levar em conta aspectos econômicos, do que aumentar a espessura da placa.

A outra questão que se coloca é se o coeficiente global de perda de calor do coletor (U_L) interfere no comportamento evidenciado pela Figura 4. A Figura 5 mostra que a relação entre espessura e quantidade de tubos no que diz respeito a F' , praticamente independe de U_L , indicando que o projetista pode considerar tendência semelhante à apresentada anteriormente seja para coletores bem isolados termicamente (U_L baixo) seja para coletores com pouco isolamento térmico (U_L alto).

Por fim, foi realizada uma análise da influência de variações relacionadas à espessura e quantidade de tubos para diferentes configurações isolamento térmico do coletor, representado pelo coeficiente global de perda de calor do coletor U_L . A Figura 6 relaciona as grandezas U_o e U_L definidas no item 2.1 deste trabalho, para diferentes pares

espessura e quantidade de tubos. Considerando que $F^r = U_o / U_L$ é a inclinação das curvas em cada ponto, fica evidente que alterações espessura e quantidade de tubos são relevantes para U_L maiores (as curvas de espessuras diferentes tem inclinações diferentes na parte direita do gráfico) enquanto que para U_L menores, alterações de espessura e quantidade de tubos são pouco relevantes para F^r (as curvas de espessuras diferentes tem inclinações semelhantes na parte esquerda do gráfico).

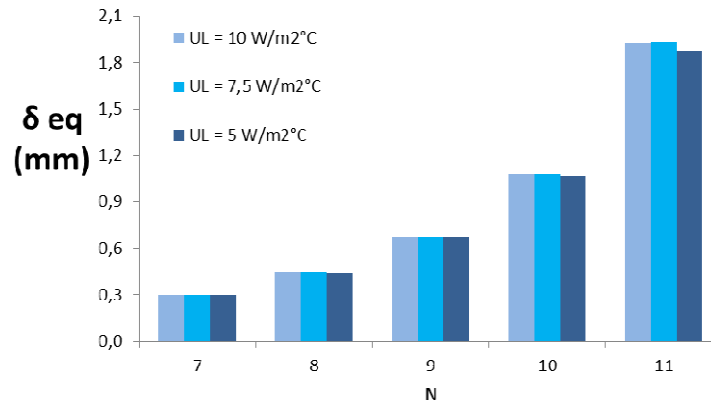


Figura 5- Espessuras equivalentes para diferentes coeficientes globais de perda de calor

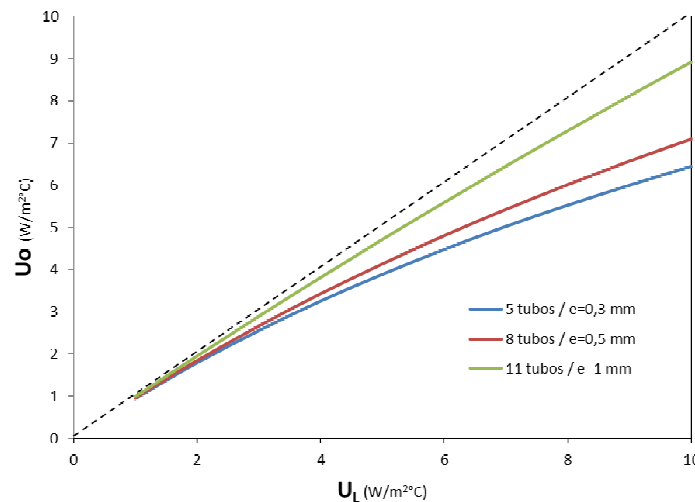


Figura 6- Relação entre os coeficientes de perda de calor para o ar

Sendo assim, um projetista que tenha um coletor com pouco isolamento térmico (U_L alto) possui a espessura e a quantidade de tubos como variáveis relevantes para melhorar F^r , enquanto que, caso tenha um coletor com bom isolamento térmico (U_L baixo), variações de espessura e quantidade de tubos são pouco relevantes.

6. CONCLUSÕES

Dentre os diversos parâmetros que influenciam o fator de eficiência de um coletor solar fechado plano, foram estudados especificamente o papel da espessura da placa absorvedora e da quantidade de tubos verticais. Definido um coletor para estudo (Tabela 1), as simulações mostraram significativa influência de ambos os parâmetros no fator de eficiência (Figura 2). Conclui-se, também, que variações de espessura tem menor relevância quanto maior a quantidade de tubos, já que com o aumento da quantidade de tubos, e consequente redução da distância entre tubos, diminui a importância da condução de calor pelas aletas ou placa absorvedora (Figura 2).

Comparando entre si as duas variáveis, constatou-se que a espessura da placa é, em termos percentuais, menos impactante do que a quantidade de tubos no fator de eficiência do coletor (Figura 3 e 4). Além disso, os resultados mostraram que esse comportamento praticamente não depende das perdas térmicas do coletor (Figura 5).

Adicionalmente, mostrou-se que a sensibilidade do fator de eficiência do coletor às variações de espessura e quantidade de tubos aumenta com a melhora do isolamento térmico do coletor, enquanto que para coletores com elevados coeficientes globais de perda de calor, variações dos dois parâmetros pouco influenciam o fator de eficiência (Figura 6).

Por fim, é importante lembrar que o fator de eficiência do coletor está relacionado com a eficiência do coletor, porém, não é o único parâmetro relacionado à eficiência térmica. Além disso, ressalta-se que nenhum aspecto

econômico foi levado em conta no presente trabalho, embora um estudo desse tipo seja de grande valia para o prosseguimento desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- Abdel-Khalik, S. I., 1976. Heat removal factor for a flat plate solar collector with a serpentine tube. *Solar Energy*, Volume 18, pp. 59-64.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 2003. ASHRAE 93. Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors, Atlanta, EUA.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. NBR 15747-2. Sistemas Solares Térmicos e Seus Componentes - Coletores Solares Parte 2 - Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro.
- Badescu, V., 2006. Optimun fin geometry in flat plate solar collector systems. *Energy Conversion and Management*, Volume 47, pp. 2397-2413.
- Bliss Jr., R. W., 1959. The derivations of several “Plate-Efficiency factors” useful in the design of flat plate solar heat collectors. *Solar Energy*, dezembro, Volume 3, pp. 55-64.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*, Solar Energy Laboratory. University of Wisconsin-Madison: Wiley press.
- Eisenmann, W., Vajen, K., Ackermann, H., 2004. On the correlations between collector efficiency factor and material content of parallel flow flat-plate solar collector. *Solar Energy*, Volume 76, pp. 381-387.
- European Committe for Standardization, 2006. EN 12975-2. Thermal Solar Systems and Components – Solar Collectors.. Bruxelas. CEN.
- European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF), 2016. “Solar Thermal Markets in Europe - Trends and markets statistics 2015”.
- Ghamari, D., Worth, R., 1992. The effect of tube spacing on the cost-effectiveness of a flat-plate solar collector. *Renewable Energy*, Volume 2, n° 6, pp. 603-606.
- Institute for Energy Economics and Financial Analysis, 2016. “Three Trends Highlightting the Accelerating Global Energy Market Transformation”. Cleveland, USA,
- International Organization for Standardization, 2017. ISO 9806. Solar Energy – Solar thermal collectors – test methods. Berlim, Alemanha.
- Jones, G. F., 1987. Consideration of the heat removal factor for liquid-cooled flat-plate solar collectors. *Solar Energy*, Volume 38, No. 6, pp. 455-458.
- Mauthner, F., Weiss W., Spörk-Dür. M., 2016. “Solar Heat Worldwide - Markets and Contribution to Energy Supply”. International Energy Agency, Gleisdorf, Austria, Maio.
- Norton, B., Hobson, P. A., Probert, S. D., 1989. Heat removal from a triangular finned flat-plate solar-energy collector. *Applied Energy*, Volume 34, pp. 47-55.
- Prado, R. T. A., Sowmy, D. S., 2016. Innovations in Passive Solar Water Heating Systems. In book: *Advances in Solar Heating and Cooling*, pp.117-150, Capítulo, Dezembro.
- Sowmy, D. S., Prado, R. T. A., Ara, P. J. S., 2016. Uncertainties associated with solar collector efficiency test using na artificial solar simulator. *Renewable Energy*. Vol. 108, Agosto 2017, pp. 644-651.

INFLUENCE OF ABSORBER PLATE THICKNESS AND NUMBER OF TUBES VARIATIONS IN FLAT PLATE SOLAR COLLECTORS EFFICIENCY FACTORS FOR WATER HEATING PURPOSES

Abstract. *In the context of the search for renewable energy sources, solar thermal applications has been an alternative of growing interest. However, the deceleration of the the solar thermal market growth in recent years and the progress of products quality and certification programs has driven the development of solar collectors that operate with higher thermal efficiencies to convert solar radiation into heat. For this purpose, the collector design has great relevance because it defines the constructive characteristics of the product that elevate the heat absorption and minimize thermal losses to ambient air. Among the several design parameters that influence the collector thermal efficiency, two of then are studied in this work: the absorber plate thickness and the number of riser tubes. The collector efficiency factor (F') is used to analyze the relative importance of these parameters and algebraic models extracted from the literature are used to calculate F' in a flat plate collector with known project characteristics. The results showed a significant influence of the thickness and the number of tubes in the collector efficiency factor, being that the effect of the increase of thickness is, in percentage terms, less important than the effect of the increase of the number of tubes. It was verified that this behavior practically independent of the collector overall heat loss coefficient. In addition, the results showed that the influence of variations in thickness on the efficiency factor decreases with the reduction of tube spacing. Moreover, it was shown that the sensitivity of the collector efficiency factor to the variations of pipe thickness and number of tubes increases with the improvement of collector thermal insulation, whereas for collectors with high overall heat loss coefficient, variations of the two parameters little influence the efficiency factor.*

Key words: *Solar Collector Efficiency Factor, Plate Thickness, Number of Tubes*