



Proposta de uma rotina para cálculo da área necessária de uma placa coletora solar

André Felipe Brescovici Nunes (UNIOESTE) andre_lipaum@hotmail.com

Eduardo César Dechechi (UNIOESTE) dechechi@pti.org.br

Resumo: O presente trabalho consiste em proposta de programação que auxilie de forma simples e prática o dimensionamento de um sistema de aquecimento solar. A utilização da energia solar é uma maneira eficiente para contribuir com a redução da demanda energética de uma forma limpa e renovável. Foi realizado o equacionamento matemático de um sistema genérico a partir das equações básicas de balanço de energia e balanço de massa. Com base nas equações encontradas na modelagem matemática criamos um modelo computacional utilizando o Software de simulações EES (Engineering Equation Solver). O modelo criado gera uma estimativa sobre as dimensões necessárias de uma placa coletora solar, que atenda as necessidades específicas do usuário. Foi realizada uma simulação levando em conta uma placa solar comum com sua superfície coletora constituída de aço galvanizado, uma residência com 4 pessoas, objetivando a saída da água a uma temperatura de 70°C. O resultado da simulação condiz com os resultados encontrados fisicamente, logo o modelo gerado pode ser usado como auxílio no dimensionamento desses sistemas. de aquecimento solar de água com placas coletoras simples de único passe.

Palavras Chave: Aquecimento solar, placas coletoras, simulação computacional.

1. Introdução

Com a tecnologia se expandindo velozmente, aumentou-se também a demanda energética. Em meio a esse panorama, o homem se obrigou a buscar novas fontes de energia. Nesta abordagem, a utilização de formas de energia limpas e renováveis se torna um aspecto importantíssimo em todas as áreas da tecnologia.

O uso da energia solar é uma das formas de energia mais limpas que existem. Um dos usos mais comuns da energia solar é o aquecimento de água para uso doméstico e industrial. Além de não poluir o meio ambiente e de ser uma fonte renovável, o aquecimento solar de água tem se mostrado muito eficiente do ponto de vista operacional. Devido à crescente utilização desse sistema de aquecimento, os custos para se ter um nas indústrias e nos domicílios estão cada vez menores.

A tecnologia do aquecedor solar já vem sendo utilizada no Brasil desde a década de 60, época em que surgiram as primeiras pesquisas. As primeiras empresas com atuação comercial datam de 1973. Hoje, estima-se que existam instalados no Brasil aproximadamente 1,5 milhões de m² de coletores solares, aquecendo diariamente 150 milhões de litros de água. Estima-se que mais de 1,6 milhões de pessoas já se beneficiam com a tecnologia do aquecedor solar (VARELLA, 2004).

Com a perspectiva de que a energia elétrica no Brasil se torne, a cada dia, mais escassa e mais cara, o consumidor vem modificando seu comportamento, despertando para sua melhor utilização. O sistema se paga sozinho pela redução nas contas de energia elétrica, podendo chegar até 50% no seu valor (VARELLA, 2004).



Todo esse conforto vem aliado a economia, pois o sistema se paga sozinho pela redução nas contas de energia elétrica, podendo chegar até 50% no seu valor (VARELLA, 2004).

Este trabalho visa desenvolver a partir das equações básicas da transferência de calor uma maneira fácil de calcular as dimensões de uma placa coletora de energia solar.

2. Conceitos aplicados

Nesta seção serão apresentados os conceitos térmicos envolvidos, a modelagem matemática aplicada e a rotina criada.

2.1. Conceitos térmicos envolvidos

Neste seção serão apresentados os conceitos básicos térmicos utilizados nos cálculos de sistemas de aquecimento solares.

Para essa análise foi considerado o sistema em estado estacionário, logo as equações utilizadas independem do tempo, para fins didáticos essa análise pode ser aplicada chegando a resultados satisfatórios. Segundo INCROPERA (2002), temos:

- Lei de Fourier (Condução):

$$qx'' = -k \frac{dT}{dx} \quad [W/m^2] \quad (1)$$

A lei de Fourier foi utilizada para quantificar o fluxo de calor que ocorre por condução na superfície do coletor e do reservatório.

- Taxa de transferência de calor

$$q = q'' \cdot Area \quad [W] \quad (2)$$

- Lei do resfriamento de Newton (Convecção):

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad [W/m^2] \quad (3)$$

A lei do resfriamento de Newton foi usada para quantificar o fluxo de calor que ocorre por convecção entre área da placa do coletor e do reservatório com meio.

- Lei da emissão de radiação (Radiação):

$$q''_{rad} = \varepsilon \cdot \delta \cdot (T_s^4 - T_{vizinhança}^4) = \alpha \cdot G \quad [W/m^2] \quad (4)$$

A lei da emissão de radiação foi utilizada para quantificar o fluxo de calor que ocorre por radiação entre a área da placa do coletor e do reservatório e as demais superfícies que emitem radiação.

- Conceito da absorvidade (α):

$$q''_{rad} = \alpha \cdot G \quad [W/m^2] \quad (5)$$

A absorvidade representa o percentual de energia térmica que uma superfície pode absorver da radiação incidente (G), pois nenhuma superfície existente consegue absorver totalmente a radiação incidente, pois uma parte dessa energia é refletida. Para se obter uma



maior eficiência do aquecedor solar, devem-se escolher os materiais que tenham maior absorvidade.

- Conceito de resistência térmica:

$$R_{t\text{condução}} = \frac{L}{k.A} \quad (6)$$

$$R_{t\text{convecção}} = \frac{1}{h.A} \quad (7)$$

$$qx'' = \frac{\Delta T}{R_{Total}} \quad [W/m^2] \quad (8)$$

O conceito de resistência térmica foi usado para facilitar os cálculos das perdas térmicas da superfície do reservatório, já que o mesmo possui sua parede composta por vários materiais.

- Conceito de eficiência:

$$\eta = \frac{q''}{G_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (9)$$

O conceito de eficiência nos diz que a eficiência de um aquecedor solar depende do fluxo total de calor na superfície dividido pela radiação solar incidente que é o representa o máximo de calor que essa superfície pode absorver.

- Conceito do calor (Q) que é necessário ser transmitido à água:

$$Q = m.Cp.\Delta T \quad [Kcal] \quad (10)$$

O Conceito do calor (Q) que é necessário ser transmitido à água é importante, pois descreve quanto de calor que deve ser adicionado à água para que ela atinja a temperatura desejada de saída.

- Área necessária do coletor:

$$\text{Área}_{\text{coletor}} = \frac{Q}{G_s.\eta} \quad [m^2] \quad (11)$$

A equação acima nos diz qual a área necessária das placas coletoras para conseguir atingir o calor necessário (Q) com a eficiência (η) do sistema.

- Segundo INCROPERA (2002) o coeficiente de transferência de calor por convecção para dias com pouco vento pode ser estimado por:

$$h = 0,22(T_s - T_\infty)^{1/3} \quad [W/m^2.K] \quad (12)$$

A equação acima serve para calcularmos o coeficiente de transferência de calor por convecção, que varia de acordo com a temperatura da superfície e com a temperatura do meio.

Nas equações:

h = Coeficiente de transferência de calor por convecção $[W/m^2.K]$

k = Coeficiente de transferência de calor por condução $[W/m^2.K]$

T_s = Temperatura da superfície $[k]$



T_{∞} = Temperatura do meio [k]

ε = Emissividade ($0 \leq \varepsilon \leq 1$)

G = Irradiação Solar (W/m^2)

δ = Constante de Stefan – Boltzmann = $5,67 \cdot 10^{-8}$ [$W/m^2 \cdot K^4$]

C_p = Calor específico da água 1 [Kcal/ Kg $^{\circ}$ C]

2.2. Modelagem Matemática

Nesta seção será apresentado uma análise das trocas de calor no aquecedor solar e seus respectivos cálculos aplicados a sistemas de aquecimento solares.

A placa coletora pode apresentar várias configurações construtivas com relação ao número de passes e chicanes. No presente trabalho serão realizados os cálculos baseados em uma placa coletora solar quadrada, de único passe, sem a passagem da água por chicanes.

Para a realização do cálculo da área necessária da placa coletora primeiramente deve-se calcular as eficiências do coletor e do reservatório. Para isso são realizados balanços de energia tendo com os mesmos como volume de controle. As eficiências dependem da Radiação solar incidente. Serão realizados cálculos de eficiência para dias ensolarados e para dias nublados, pois é deseja-se calcular a área necessária da placa para que o sistema mantenha a água quente em uma condição de um dia de sol e três dias nublados. Segue nos ítems posteriores a forma genérica como os conceitos foram relacionados para a realização dos cálculos.

2.2.1. Balanço de energia no coletor

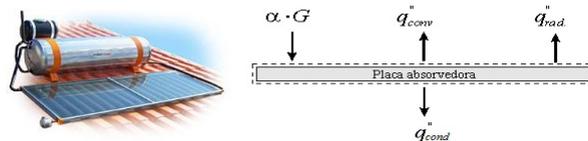


Figura 1 – Balanço de energia sobre a superfície do coletor solar.

Incidindo no coletor há uma radiação solar, que é absorvida a uma intensidade (α) que varia de acordo com o material da superfície da placa coletora. O coletor está emitindo radiação para o céu, já que o mesmo sempre está a uma temperatura inferior a placa, a emissividade ε depende do material da superfície da placa coletora. A placa também está trocando calor por convecção para o meio a uma intensidade que depende da temperatura da superfície da placa e da temperatura do meio. O balanço de energia resulta em:

$$q''_{coletor} = (\alpha_{col} \cdot G) - (\varepsilon_{col} \cdot \delta \cdot (T_{col}^4 - T_{ceu}^4)) - (h_{col} \cdot (T_{col} - T_{\infty})) \quad [W/m^2] \quad (13)$$

A eficiência do coletor pode ser calculada por:

$$\eta = \frac{q''_{coletor}}{G} \quad (14)$$



2.2.2. Balanço de energia no reservatório

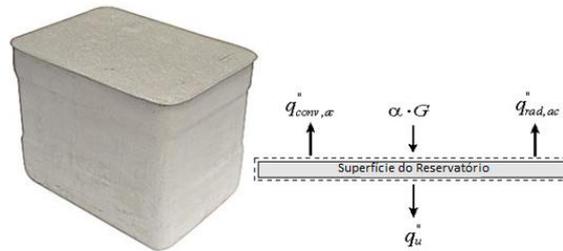


Figura 2 – Balanço de energia sobre a superfície do reservatório térmico.

Considerou-se o reservatório do sistema em questão como quadrado de área variável. Para diminuir as perdas de calor por condução nas paredes do reservatório, decidiu-se que o reservatório será de concreto com 3 mm de espessura, isolado externamente com uma camada de 10 mm de borracha e revestido mais externamente ainda por uma placa de 1 mm de alumínio.

No cálculo o reservatório foi subdividido em duas partes, uma parte é composta pelas 5 faces expostas a troca térmica com o vento e recebe diretamente a radiação, (constituídas pelas 4 faces laterais somadas com a área superior), a outra parte é composta pela face que fica na parte de baixo que realiza troca térmica por condução com a base que sustenta o reservatório. Para haver a quantificação correta da troca térmica utilizou-se o conceito de taxa de transferência de calor e multiplicou-se pelas áreas expostas.

O reservatório irá absorver uma quantidade de calor que depende também da absorvidade do reservatório e da intensidade da radiação solar. Há uma troca de calor com o meio por convecção nas 5 faces expostas. Pode-se aplicar o conceito de resistências térmicas para modelar as paredes do reservatório. O reservatório também perderá calor por condução para a superfície inferior, onde ficará em contato com a superfície engastada. Essas considerações resultam nos seguintes cálculos:

Resistência térmica nas paredes:

$$q_{5\text{faces}} = 5 \cdot Area_{lateral} \cdot (T_{desejada} - T_{res}) / \left(\left(\frac{Espessura_{borracha}}{K_{borracha}} \right) + \left(\frac{Espessura_{concreto}}{K_{concreto}} \right) + \left(\frac{Espessura_{aluminio}}{K_{aluminio}} \right) + \frac{1}{h_{res}} \right) \quad (15)$$

Condução na parte inferior:

$$q_{cond_inferior} = Area_{lateral} \cdot (T_{desejada} - T_{inferior_reservatorio}) / \left(\left(\frac{Espessura_{borracha}}{K_{borracha}} \right) + \left(\frac{Espessura_{concreto}}{K_{concreto}} \right) + \left(\frac{Espessura_{aluminio}}{K_{aluminio}} \right) \right) \quad (16)$$

Radiação incidente no reservatório:

$$q_{rad_res} = 2 \cdot Area_{lateral} * (\alpha_{res} \cdot G - \left(\left(\epsilon_{res} \cdot \delta \cdot (T_{res}^4 - T_{ceu}^4) \right) \right)) \quad (17)$$

O balanço de energia, combinando as equações 15, 16 e 17 resulta em:

$$q_{total} = q_{rad_res} - q_{cond_inferior} - q_{5\text{faces}} \quad (18)$$



Finalmente a eficiência do reservatório pode ser calculada por:

$$\eta = \frac{q_{total}}{5.G} \quad (19)$$

2.2.3. Quantidade de calor necessária para aquecer a água

$$Q_{necessário} = \text{Quantidade de água por pessoa por dia} * \text{Quantidade de pessoas} * C_p * (T_{desej} - T_{\infty}) \quad [Kcal] \quad (20)$$

2.2.4. Cálculo da área necessária da placa coletora

Para realizar esse cálculo usa-se como base a equação (11). Com a utilização da equação (20) consegue-se descobrir a quantidade de calor que necessitamos fornecer a água para que ela atinja a temperatura desejada.

A radiação solar está em W/m^2 , para aplicar na fórmula temos que converte-la para $Kcal/m^2.h$, para isso multiplica-se por 3600 e divide-se por 4186,8. Feito isso multiplica-se pelo número médio de horas de insolação incidente por dia, que através de estudo bibliográfico, em média incide 7 horas de sol por dia sobre a superfície de um objeto. Portanto multiplica-se o valor da radiação solar encontrado em $Kcal/m^2.h$ por 7 horas (SANTOS, 2007).

Faz-se também adaptações na equação (11) para tornar-se aplicável ao caso de estudo. Considerando a eficiência total do sistema como sendo uma média das eficiências do coletor e do reservatório para os casos de dia ensolarado e nublado. Logo a formula resulta em:

$$\text{Área}_{necessária} = \frac{Q_{necessário} \cdot (n^{\circ} \text{diassem}_{sol} + n^{\circ} \text{diascom}_{sol})}{G_{Modificado} \cdot ((n^{\circ} \text{diascom}_{sol} \cdot (\frac{\eta_{coletorcomsol}}{4} + \frac{\eta_{reservatóriocomsol}}{4})) + (n^{\circ} \text{diassem}_{sol} \cdot (\frac{\eta_{coletorsemsol}}{4} + \frac{\eta_{reservatóriosemsol}}{4}))} \quad [m^2] \quad (21)$$

2.3. A Rotina desenvolvida

Para a simulação realizada, foram feitas algumas considerações, são elas:

- O reservatório simulado é construído com cimento (0,03 [m] de espessura) revestido por borracha (0,1 [m] de espessura) e externamente Alumínio (0,1 [m] de espessura);
- O reservatório possui capacidade de armazenamento de 1000 litros com dimensões de 1x1x1 [m];
- A placa coletora é construída de aço galvanizado;
- Deseja-se que a temperatura de saída seja 60°C;
- Radiação solar incidente para dias ensolarados igual a 1367 [W/m²] e dias nublados igual a 100 [W/m²];
- Residência com 4 pessoas consumindo 40 litros de água quente por dia;
- Temperatura ambiente igual a 40 °C;
- Deseja-se ter água aquecida mesmo em situações climáticas de 3 dias sem sol;
- Foram desprezadas as perdas de calor na tubulação;
- Reservatório exposto a radiação solar e dias com pouco vento.

Para implementar a rotina no programa EES simplesmente deve-se escrever as equações citadas no item 2.2 de forma compatível com o software, adicionando as variáveis de entrada. Para a simulação realizada as variáveis de entrada são as mostradas na Tabela 1.



Tabela 1 – Variáveis de entrada usadas na simulação

<i>Variável</i>	<i>Dados usados para a simulação</i>
Absortividade do coletor (α (coletor))	0,8 [Aço Galvanizado]
Emissividade do coletor (ε (coletor))	0,10 [Aço Galvanizado]
Absortividade do reservatório (α (coletor))	0,15 [Alumínio]
Emissividade do reservatório (ε (coletor))	0,05 [Alumínio]
Número de pessoas na residência	4 [Pessoas]
Número de dias sem sol	3 [Dias]
Número de dias com sol	1 [Dia]
Quantidade usada de água por pessoa por dia	40 [L]
Temperatura desejada	60 [°C]
Temperatura ambiente	22[°C]
Constante de Stefan – Boltzmann (σ)	$5,67 \cdot 10^{-8}$ [$W/m^2 \cdot K^4$]
Temperatura da superfície do coletor com sol	75 [°C]
Temperatura da superfície do coletor sem sol	22[°C]
Temperatura da superfície do reservatório com sol	60 [°C]
Temperatura da superfície do reservatório sem sol	22[°C]
Temperatura do céu	-10 [°C]
Irradiação solar com sol (G)	1367 [W/m^2]
Irradiação solar sem sol (G)	100 [W/m^2]
Coefficiente de transferência de calor por condução da borracha (k)	0,16 [$W/m \cdot K$]
Coefficiente de transferência de calor por condução do cimento (k)	0,58[$W/m \cdot K$]
Coefficiente de transferência de calor por condução do alumínio (k)	237 [$W/m \cdot K$]
Espessura do cimento	0,03 [m]
Espessura da borracha	0,10 [m]
Espessura do alumínio	0,01 [m]

3. Resultados

Os resultados da simulação são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados da Simulação

<i>Parâmetro</i>	<i>Resultados</i>
Eficiência do coletor em dias ensolarados	72 [%]
Eficiência do reservatório em dias ensolarados	3,9 [%]
Eficiência do coletor em dias nublados	4,6 [%]
Eficiência do reservatório em dias nublados	- 6 [%]
Área necessária do coletor	20,5 [m^2]

Os resultados indicam que para os dados inseridos de entrada o coletor terá uma eficiência de 72% em dias com sol e 4,6% em dias nublados. Logo mesmo com dias com nuvens o coletor irá aquecer a água. Percebe-se também que o reservatório aquece a água em dias ensolarados com uma eficiência de 3,9%, porém em dias nublados ele atrapalha o aquecimento do sistema, perdendo calor a uma eficiência de -6%.

Com esses dados de entrada chegamos a uma área necessária da placa coletora de 20,5 m^2 , ou seja, com uma placa coletora desse tamanho e com um reservatório com as dimensões descritas anteriormente, o sistema fornecerá água a 60°C mesmo com 3 dias seguidamente nublados.



4. Considerações finais

Analisando os resultados das simulações nota-se que o modelo implementado apresentou resultados compatíveis com a realidade. As placas coletoras apresentaram área e rendimento próximo ao previsto por SANTOS (2007) e ARRUDA (2004).

Nota-se o quão é importante uma rotina aplicada em um software para ajudar a tomar as decisões corretas. Podem-se testar várias configurações e alternativas para ver como o sistema se comporta, antes de gastar recursos para a viabilização do mesmo, sem a certeza do sucesso.

Viu-se que sistemas de aquecimento solares é uma solução aplicável quando se quer economizar energia elétrica.

O software utilizado realiza rapidamente os cálculos, porém possui uma grande limitação na interface com o usuário e não possui recursos de construção de gráficos. Os gráficos são extremamente importantes na hora de analisar as variáveis. Para a perfeita validação do modelo seria importante realizar experimentalmente as situações e comparar com os resultados obtidos via simulação computacional, podendo-se assim mensurar o erro e as limitações do modelo, e assim garantir o perfeito funcionamento do software.

Referências

- ARRUDA, Laerte Bernardes. *Operação de sistemas de aquecimento solar de água com controle de vazões em coletores planos*. São Paulo: 2004. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola politécnica da Universidade de São Paulo – USP-SP., São Paulo, 2004.
- SANTOS, Natanaelyle Randerbeng Gomes dos. *Projeto, Construção e análise de coletores solares alternativos usando garrafas PET*. Natal: 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRGN-RN., Natal, 2007.
- VARELLA, Fabiana Karla de Oliveira Martins. *Tecnologia solar residencial: inserção de aquecedores solares de água no Distrito de Barão Geraldo – Campinas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UNICAMP, Campinas - São Paulo, 2004.
- INCROPERA, Frank P.; Dewwit, David P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 6º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.