

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONCENTRADOR SOLAR

Tiago Kempfer

Kempfer.tiago@gmail.com

Resumo. O presente artigo reúne os resultados de ensaios e o método de construção de um concentrador solar. Um protótipo de coletor solar concentrador foi construído, as várias considerações e sensibilidades do projeto serão discutidas, assim como o método de construção. A etapa final consiste dos ensaios experimentais para a verificação da eficiência.

Palavras chave: aquecedor, solar, concentrador água, parabólico, energia.

1. Introdução

A sociedade moderna necessita de várias formas de energia, porém, apesar de engenhosos métodos de conversão de energia, sua fonte está centralizada desde a segunda revolução industrial nos combustíveis fósseis.

A voracidade com que os recursos vêm sendo consumidos levou a questões sobre a estabilidade do modelo energético atual e cabe aos engenheiros proporem soluções dentro de restrições impostas pela sociedade. As principais restrições estão relacionadas ao meio ambiente, a viabilidade econômica e ao consumo sustentável. Uma fonte renovável atende a primeira e a terceira restrição e é em função da segunda que este trabalho é proposto.

A energia solar é uma fonte renovável que pode ser convertida em potência mecânica e elétrica e ainda ser utilizada diretamente como fonte de um concentrador solar.

2. Construção do protótipo

2.1 Estrutura

A construção do protótipo foi iniciada com a montagem da estrutura de sustentação do coletor. Para esta foram utilizadas cantoneiras de aço, em L e em T, soldadas para formar uma caixa, conforme a figura 1.



Figura 1. Estrutura do coletor

Por ser de aço carbono as cantoneiras tiveram que ser pintadas para evitar que corroessem ao longo do tempo.

A base da estrutura é composta de compensado para possibilitar a fixação dos gabaritos parabólicos da figura 2.



Figura 2. Gabaritos parabólicos

Os gabaritos parabólicos são necessários para conformar o concentrador que refletirá a radiação no foco da parábola.

2.2 Concentrador

O concentrador é o elemento responsável por concentrar a radiação incidente na área de abertura do coletor focando na área do absorvedor. Para essa aplicação foram utilizadas três chapas de alumínio (alta refletividade) de 1x385x1000 mm da figura 3.



Figura 3. Chapa de alumínio dobrada

Para possibilitar que a chapa acompanhasse o perfil parabólico da figura 2 foi necessário utilizar uma calandra para curvar a chapa a uma curvatura próxima ao perfil parabólico. A chapa curvada foi então fixada ao gabarito parabólico de maneira a garantir a curvatura desejada.

A área de abertura do concentrador foi estabelecida em 1 m², de forma que cada chapa, quando dobrada, apresentaria 0,33 m² de área projetada. A área projetada é a área correspondente à projeção da área da chapa na superfície normal à direção da radiação solar incidente.

2.3 Absorvedor

O absorvedor é o elemento que converte a radiação solar em energia interna do fluido de trabalho, sendo, portanto, o elemento que troca calor.

Para essa aplicação foram utilizados tubos de cobre DN 15 pintados de preto (figura 4).



Figura 4. Tubos de cobre pintados de preto

Nessas condições os tubos de cobre têm alta capacidade de absorver radiação e de transferir calor para a água (alta condutividade), porém também estão sujeitos a perder calor por convecção e condução.

Para evitar as perdas por convecção foram utilizados tubos de vidro envolvendo os tubos de cobre com uma fina camada de ar, de maneira que, nessa camada, só existisse condução através do ar, cujo coeficiente de condutividade térmica é 0,030 W/m.K (Incropera), o que o caracteriza como um isolante térmico. Tal característica do ar somada à sua alta transmissividade tornam-no uma ótima alternativa para o isolamento térmico do coletor.

Porém é necessário estabelecer qual espessura a camada de ar deve apresentar. Uma camada muito fina implicaria em maiores perdas por condução, enquanto uma camada muito espessa poderia acarretar em trocas por convecção. Para garantir a máxima espessura possível onde os efeitos de convecção do ar não são relevantes foram utilizados os resultados de Raythby e Hollands (Incropera) para a convecção livre com fluido confinado no espaço anular entre cilindros longos, horizontais concêntricos. Esse estudo estabelece que se $Ra_c^* < 100$ não haverá efeitos de convecção no fluido confinado, sendo:

$$Ra_c^* = \frac{\left[\ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right) \right]^4}{L^3 \left(D_i^{-3/5} + D_o^{-3/5} \right)^5} \cdot Ra_L \quad (1)$$

E,

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_i - T_e)L^3}{\nu\alpha} \quad (2)$$

Sendo:

RaL o número de Rayleigh (adimensional);

D0 o diâmetro interno do tubo de vidro (mm);

Di o diâmetro externo do tubo de cobre (15 mm);

L a espessura da camada de ar (mm);

g a aceleração da gravidade (m/s²);

β o coeficiente de expansão térmica volumétrica (K⁻¹);

Ti a temperatura da superfície do tubo de cobre (máxima de ≈ 100°C);

Te a temperatura da superfície interna do tubo de vidro (≈ 62°C);

ν a viscosidade cinemática do ar (m²/s);

α a difusividade térmica do ar (m²/s).

Substituindo os valores para o ar, o diâmetro interno para o do tubo de cobre e a temperatura externa do tubo para a temperatura média entre a mínima de operação (ambiente, ≈24° C) e a máxima (ebulição da água, ≈100° C) resulta que Ra_c^* será menor que 100 quando o diâmetro externo do espaço anular for menor que 29 mm. Assim, os tubos de vidro da figura 5 possuem diâmetro externo de 30 mm e interno de 28 mm.



Figura 5. Tubos de vidro de diâmetro interno 28 mm

Conforme discutido anteriormente, outro ponto importante para evitar perdas no coletor é reduzir a condutividade através dos tubos de cobre, para isso foram utilizadas buchas de PTFE (figura 6) nas extremidades do coletor. O PTFE possui baixa condutividade - $0,35 \text{ W/m.K}$ – (Incropera) e também foi utilizado para o ajuste do tubo de cobre com o tubo de vidro (figura 7).



Figura6. Bucha de PTFE



Figura 7. Ajuste do tubo de cobre e tubo de vidro

Para garantir a vedação do conjunto foram utilizados anéis de vedação (o'rings) entre a bucha e o tubo de cobre.

Uma consideração importante sobre a vedação do conjunto é o efeito da dilatação térmica do cobre, assim, para o cálculo da variação do raio do tubo de cobre devido à dilatação térmica foi verificado que o coeficiente de dilatação térmica linear do cobre é de $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (Nussenzveig) e que, portanto, a variação do perímetro do tubo seria dada por:

$$\Delta P = \alpha \cdot P_0 \cdot \Delta T \quad (3)$$

$$\therefore 2 \cdot \pi \cdot r_f - 2 \cdot \pi \cdot r_0 = \alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot \Delta T \quad (4)$$

Substituindo os valores do coeficiente de dilatação térmica e a variação da temperatura (de 24° ao máximo de 100°):

$$\therefore r_f - r_0 = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot 15,76 = 1,9 \cdot 10^{-2} mm \quad (5)$$

Ou seja, o tubo se dilatará menos de 2 centésimos de milímetro, assim, essa variação foi desprezada. A figura 8 mostra o conjunto dos três absorvedores.



Figura 8. Absorvedores

2.4 Montagem

Com o concentrador e o coletor construídos foi necessário fixá-los na estrutura e garantir o posicionamento do absorvedor no foco, isso foi realizado através da estrutura de compensado da figura 9.

O conjunto foi então fixado no compensado da base da estrutura, conforme figura 10.



Figura 9. Estrutura para o posicionamento do absorvedor no foco do concentrador



Figura 10. Montagem da estrutura

2.4.1 Isolamento térmico

Tendo em vista a função do coletor solar foi necessário garantir o isolamento térmico do conjunto. O isolamento do interior da estrutura com o ambiente tem duas funções distintas, uma é auxiliar no isolamento do absorvedor, contribuindo para uma maior temperatura de parede externa do tubo de vidro (o que reduz a perda por condução através do ar no interior do tubo). A outra função do isolamento é funcionar como uma estufa, reduzindo a emissão da radiação solar direta na forma de radiação difusa.

Para o isolamento da estrutura foi utilizada lã de rocha sobre chapas de alumínio, como visto na figura 11.



Figura 11. Isolamento térmico com lã de rocha

Sobre o coletor foi encaixada uma chapa de vidro, cujas propriedades de alta transmissividade para radiação visível e baixa para os demais comprimentos de onda (radiação difusa infravermelha). Como para o coletor concentrador só a radiação direta importa, visto que esta pode ser direcionada para o absorvedor, o efeito do vidro de reter a radiação difusa no interior da estrutura contribui para a redução das perdas por emissão.

Na tubulação de cobre do coletor foi utilizada espuma elastomérica para o isolamento da seção dos tubos que interliga os absorvedores.



Figura 12. Soldagem dos tubos de cobre

A estrutura montada com os isolamentos térmicos e a cobertura de vidro é apresentada na figura 13.



Figura 13. Coletor terminado

2.5 Custos

A tabela 1 apresenta os custos dos materiais para a fabricação do protótipo:

Tabela 1. Custos do protótipo

Material	Empresa	Custo
Cantoneiras de aço	Glauco	R\$ 91,80
Chapa de vidro	Divinal Vidros	R\$ 121,77
Chapas de alumínio	GGD Metals	R\$ 236,15
Compensado	Madeiras Pinheiro	R\$ 65,00
Lã de rocha	Antonio Ferreira	R\$ 48,00
Tarugo de PTFE	Univerflex	R\$ 205,00
Tubos de vidro	Laborglass	R\$ 86,06
Tubos e conexões de cobre	Hidráulica Tropeiros	R\$ 70,00
Total	-	R\$ 923,78

Todas as despesas com os materiais utilizados na fabricação do protótipo foram pagas pela Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia – INOVATA FDTE.



Figura 16. Concentração fora do foco, antes do ajuste da inclinação do coletor

De acordo com a NBR 15747 a vazão deve ser fixada em $0,02 \text{ kg/s/m}^2$ de área do coletor, para a área de abertura de 1 m^2 do coletor a vazão foi fixada em $0,02 \text{ l/s}$, ou 20 ml/s . Porém, para tornar a medição da temperatura mais precisa, aumentando sua variação entre a entrada e saída, a vazão utilizada foi de 10 ml/s .

3.3 Resultados

Foram realizadas quatro medições das temperaturas de entrada e saída e da vazão, os resultados são mostrados na tabela 2:

Tabela 2. Resultados medidos

	Cp (kJ/kg.K)	Temp. ambiente (°C)	Radiação (W)		
	4,18	32,7	450		
Hora	Temp. entrada (°C)	Temp. saída (°C)	Vazão (ml/s)	Energia absorvida (W)	Eficiência
12:12	28,9	32,2	11	151,7	34%
12:25	29,3	33,7	11	202,3	45%
13:08	30,1	35,2	10	213,2	47%
13:25	31,8	38,3	10	271,7	60%
Média	30,0	34,9	11	211,8	47%

Também foi testada a temperatura de estagnação (máxima possível) para o coletor, sem nenhuma vazão significativa a temperatura na saída do coletor chegou a **$96,8^\circ\text{C}$** . O coletor não apresentou nenhuma avaria após atingir essa temperatura.



Figura 17. Coletor solar em funcionamento

4 Conclusões

Foi construído um coletor solar concentrador e foi realizado o ensaio para verificação da eficiência desse equipamento. Os resultados obtidos indicam uma eficiência média de 47%, porém essa eficiência é válida para a faixa de temperatura de 30 – 40 °C em que o ensaio foi realizado.

Associado a esses resultados pode-se destacar as características únicas do coletor construído, como a utilização de três parábolas para a concentração, o que possibilitou que o coletor fosse construído dentro de uma estrutura compacta, e a utilização de ar como isolamento térmico.

A temperatura máxima atingida pelo coletor de 96,8°C indica porque os coletores concentradores são utilizados para aquecimento a elevadas temperaturas, na medida que apresentam um bom desempenho em temperaturas elevadas, diferente dos coletores planos, cuja eficiência é mais sensível ao aumento de temperatura.

A tecnologia de coletores concentradores é reconhecida como mais eficiente que os coletores planos (devido ao efeito de redução na área de perda de calor). Porém existem alguns desafios para a aplicação dessa tecnologia, principalmente envolvendo o posicionamento do concentrador com relação ao sol, para garantir o efeito de concentração. Isso foi observado durante o ensaio do coletor construído, onde o ajuste do coletor foi essencial para o seu funcionamento, sendo que sem esse posicionamento praticamente não existia absorção de radiação pelo coletor.

O ajuste norte-sul do coletor possibilita a utilização do coletor sem a necessidade de um ajuste constante, porém o alinhamento da superfície de tempos em tempos ainda é necessário. Contudo, um sistema de posicionamento totalmente automático certamente seria mais vantajoso.

5 Bibliografia

BARROS, E. V. 2007. A Matriz Energética Mundial e a Competitividade das Nações: Bases de uma Nova Geopolítica, **Engevista**, v.9, n.1, p. 47-56, 2007. Disponível em: <<http://www.uff.br>>. Acessado em: 5 de Nov. 2009.

CAMARGO, I.; BOULOS, P.; **Geometria Analítica: um tratamento vetorial**. 3ª Ed. São Paulo: Prentice Hall, 2005. 543 p.

DUFFIE, JOHN A.; BECKMAN, WILLIAM A.; **Solar Engineering of Thermal Processes**. 2ª Ed. New York: John Wiley & Sons, INC. 1991. 919 p.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 5ª Ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003. 698 p.

KAMINSKI, P. C. **Desenvolvendo Produtos com Planejamento, Criatividade e Qualidade**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 2000, 132p.

MARTINS, F. R. et al. 2005. **Mapas de Irradiação Solar para o Brasil – Resultados do Projeto SWERA**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Disponível em: <<http://www.lepten.ufsc.br>>. Acessado em: 18 de Nov. 2009.

MOMOI, Alexandre. **Projeto e Testes de Coletor Solar de Alta Eficiência**. 2005. 93p. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

TOMALSQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. 2007. Matriz Energética Brasileira: Uma Prospectiva, **Novos Estudos**, CEBRAP, 79, p. 47-69, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br>>. Acessado em: 25 de Nov. 2009.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica, 2**. São Paulo, Edgard Blücher, 2004, 314p

6. Direitos autorais

PROJECT AND CONSTRUCTION OF A SOLAR CONCENTRATING COLLECTOR

Tiago Kempfer

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Av. Prof. Luciano Gualberto, travessa 3 nº 380 – CEP 05508-10 – São Paulo - SP
Kempfer.tiago@gmail.com

Abstract. This article contains the results of the tests and the methodology to build a solar concentrating collector. A prototype was built and the several assessments of the project sensibilities will be discussed, as well as how the collector was constructed. The final stage consists of the results of the experimental tests to verify the collector's efficiency.

Keywords. heater, solar, concentrating, water, parabolic, energy.