

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM AQUECEDOR SOLAR CONCENTRADOR

Bruno Boulle Matrai

brunoboulle@hotmail.com

Resumo. *O presente artigo reúne elementos para o projeto de um aquecedor solar do tipo concentrador. O texto se concentra em explicitar fundamentação teórica, dimensionamentos, materiais e métodos visando a construção de um protótipo capaz de satisfazer os objetivos principais do trabalho. Ao longo de seu desenvolvimento, são apresentados tópicos das teorias de Transferência de Calor, Ótica e Termodinâmica. Também são aplicados neste trabalho, alguns princípios de processos de seleção de materiais.*

Palavras chave. *aquecedor, concentrador, solar, parabólico, energia*

1. Introdução

O mundo inteiro vive hoje um novo desafio: continuar seu desenvolvimento e atender às necessidades do homem moderno sem, contudo, degradar o meio-ambiente. Tal desafio pode ser resumido por duas palavras: desenvolvimento sustentável.

É nítida e preocupante a dependência da sociedade atual com relação aos combustíveis fósseis e energia elétrica; no caso do Brasil, tal dependência tem preocupado a sociedade de forma ainda mais intensa desde a ocorrência do apagão de 2001, quando verificou-se que são necessários fortes investimentos no setor energético para suprir a crescente demanda, principalmente na região Sudeste do Brasil, seja ampliando a utilização de energia proveniente do sistema hidrelétrico ou através de investimentos em fontes alternativas de energia.

A crescente discussão sobre a influência negativa que a atividade humana provoca no ambiente, associada à constatação de que fontes de energia renováveis tendem a ser muito menos agressivas ao meio-ambiente, são as principais razões que motivam o desenvolvimento das citadas fontes alternativas de energia.

1.1 Energia Solar

Quase todas as fontes de energia – hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos – são formas indiretas de energia solar, o que justifica a esta a associação "mãe das energias". Além disso, a radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio de efeitos sobre determinados materiais, os chamados fotovoltaicos.

O aproveitamento da iluminação natural e do calor para aquecimento de ambientes, denominado aquecimento solar passivo, decorre da penetração ou absorção da radiação solar nas edificações, reduzindo-se, com isso, as necessidades de iluminação e aquecimento. Assim, um melhor aproveitamento da radiação solar pode ser feito com o auxílio de técnicas mais sofisticadas de arquitetura e construção.

O aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos é feito com o uso de coletores ou concentradores solares. Os coletores solares são mais usados em aplicações residenciais e comerciais (hotéis, restaurantes, clubes, hospitais etc.) para o aquecimento de água (higiene pessoal e lavagem de utensílios e ambientes). Os concentradores solares destinam-se a aplicações que requerem temperaturas mais elevadas, como a secagem de grãos e a produção de vapor. Neste último caso, pode-se gerar energia mecânica com o auxílio de uma turbina a vapor e, posteriormente, eletricidade, por meio de um gerador.

Entre os vários processos de aproveitamento da energia solar, os mais usados atualmente são o aquecimento de água e a geração fotovoltaica de energia elétrica. No Brasil, o primeiro é mais encontrado nas regiões Sul e Sudeste, devido a características climáticas, e o segundo, nas regiões Norte e Nordeste, em comunidades isoladas da rede de energia elétrica.

2. Objetivos

Como já citado, existem inúmeras tecnologias que permitem o aproveitamento energético da radiação solar; todavia, o foco deste texto é o aquecimento de água pela utilização de concentradores solares.

O aproveitamento da energia solar aplicado a sistemas que requerem temperaturas mais elevadas ocorre por meio de concentradores solares, cuja finalidade é captar a energia solar incidente numa área relativamente grande e concentrá-la numa área muito menor, de modo que a temperatura desta última aumente substancialmente. A superfície refletora (espelho) dos concentradores tem forma parabólica, de modo que os raios solares que nela incidem sejam refletidos para uma superfície de menor área, o foco, onde se localiza o material a ser aquecido. Os sistemas parabólicos de alta concentração atingem temperaturas bastante elevadas e índices de eficiência que variam de 15% a 30% de aproveitamento da energia solar incidente, podendo ser utilizada para a geração de vapor e, conseqüentemente, de energia elétrica.

Contudo, a necessidade de focalizar a luz solar sobre uma pequena área exige algum dispositivo de orientação, acarretando custos adicionais ao sistema, os quais tendem a ser minimizados em sistemas de grande porte.

Para o presente trabalho, deseja-se projetar e construir um aquecedor solar concentrador a ser empregado no setor comercial. Embora este tipo de aquecedor tenha usualmente uma aplicação específica para a obtenção de elevadas temperaturas (superiores a 500°C), o projeto estará focado na situação específica de um aquecedor para fornecer água

quente a um restaurante, que geralmente utiliza água à temperaturas entre 55°C e 75°C para a lavagem da louça e utensílios de cozinha. Basicamente, o que justifica a escolha deste tipo de aquecedor ao invés do Coletor Solar Plano, é a temperatura necessária para aplicação em cozinha industrial, pois deve-se salientar que uma das metas deste trabalho é o projeto e fabricação de um concentrador solar de baixo custo, ou seja, empregar a menor quantidade possível de recursos para atingir a temperatura desejada; e a escolha de aquecedores planos acarretaria num maior custo, já que seriam necessárias áreas maiores.

Existem dois tipos de concentradores solares, o do tipo “prato” e o do tipo “calha”. As figuras 1 e 2 mostram exemplos da forma construtiva de cada um deles:



Figura 1 - Exemplo de concentrador solar do tipo prato



Figura 2 - Exemplo de concentrador solar do tipo calha

O presente projeto objetiva a construção de um aquecedor solar concentrador do tipo “calha” por apresentar maior facilidade construtiva e possuir ainda um bom fator de concentração.

2.2. Metodologia

Tomou-se como exemplo uma máquina de lavar louças industrial comum da marca Gemaso, consegue-se alguns dados importantes:

- Máximo de 60 ciclos de lavagem por hora
- 12 serviços por ciclo (12 pratos + 12 copos + 12 pares de talheres)
- Consumo de 4 litros de água por ciclo
- Lavagem a quente entre 55°C e 65°C

Portanto, para um restaurante de pequeno porte, temos uma média de 40 refeições por hora, o que significa 3,33 ciclos por hora de funcionamento, ou 13,33 litros de água quente por hora. Portanto o concentrador solar será projetado para aquecer 15 litros de água de 25°C a 60°C por hora no mínimo, que nos dá uma vazão de aproximadamente 0,004 kg/s.

É importante lembrar que a vazão de alimentação da máquina de lavar não é necessariamente igual à vazão de circulação da água pelo aquecedor.

O projeto iniciou-se com pesquisa bibliográfica focada no estudo das características da radiação solar, pois foi à partir deste estudo que se viabilizou o processo de seleção de materiais fundamentado na escolha de materiais seletivos; isto é, materiais que sejam capazes de absorver de forma eficiente a radiação no espectro solar, e ao mesmo tempo ter baixa emissividade no espectro infra-vermelho (radiação térmica); reduzindo substancialmente as perdas de calor para o meio.

Com isto, foi possível estimar qual será a parcela da radiação solar que será absorvida pelo tubo absorvedor, e partir então para o dimensionamento do equipamento.

Partindo-se da temperatura e vazão de operação da máquina de lavar, foi possível calcular as perdas de calor do sistema e definir as condições de operação em regime.

A quantidade de calor necessária para manter a temperatura do reservatório é dada pela soma de todas as perdas de energia que ocorrem no sistema, como as perdas de calor na tubulação e também a entrada de água gelada, que foi considerada como uma perda de calor constante e pontual, uma vez que a vazão de água fria que entra no reservatório é a mesma vazão de saída da água quente. Esta foi calculada em 1630,98 W.

Foi utilizada uma taxa de insolação de 900 W/m² a eficiência da superfície refletora foi considerada de 90%, e a eficiência do tubo absorvedor foi calculada em 79,1%, portanto, pode-se calcular a quantidade de calor que será transferida à água na interface parede do tubo – água.

Então, teremos que a quantidade de calor absorvida pelo tubo receptor será:

$$q''_{conc} = 900 \cdot 0,791 \cdot 0,90 \cdot C \approx 640,71 \cdot C \frac{W}{m^2}$$

, onde C é o fator de concentração ainda desconhecido, ou então:

$$q''_{conc} = 640,71 \cdot C = 640,71 \frac{A_{refletor}}{A_{receptor}}$$

Como já sabemos qual deve ser a taxa de transferência de calor fornecida à água, temos:

$$640,71 \frac{A_{refletor}}{A_{receptor}} \cdot A_{receptor} = 1630,98 W$$

$$A_{refletor} = \frac{1630,98}{640,71} \approx 2,5 m^2$$

Partindo-se do valor encontrado de 2,5 m² para a área projetada do concentrador, fez-se uma planilha para facilitar a escolha das dimensões da largura (B) e comprimento (L) do concentrador:

Tabela 1 - Escolha das dimensões

Área (m ²)	2,50
Largura (m)	Comprimento (m)
1,00	2,50
1,10	2,27
1,20	2,08
1,30	1,92
1,40	1,79
1,50	1,67

Foi decidido que as dimensões de B=1,20m e L=2,08 m sejam ideais, uma vez que larguras muito grandes aumentariam a imprecisão da posição do foco.

Foi necessário neste momento, definir o diâmetro do tubo que será utilizado. Verificando a disponibilidade do mercado para tubos de cobre com o fabricante *Ramo Conexões*, encontrou-se um tubo de uma polegada (2,54 cm) de diâmetro. Um tubo de grande diâmetro aumentaria o custo; e a escolha de um tubo de diâmetro muito pequeno poderia prejudicar o resultado final do projeto, uma vez que não se tem recursos para garantir uma geometria de extrema precisão ao posicionar o tubo no foco da calha.

Finalmente, o fator de concentração C do concentrador será (l=L):

$$C = \frac{A_{\text{refletor}}}{A_{\text{receptor}}} = \frac{2,50}{\pi \cdot d \cdot l} = \frac{2,50}{\pi \cdot 0,0254 \cdot 2,08} = 15,06$$

Para calcular o coeficiente de convecção no interior do tubo, é necessário saber se o regime de escoamento em seu interior é laminar, então:

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D_{\text{receptor}} \cdot \mu} = \frac{4 \cdot 0,025}{\pi \cdot 0,0254 \cdot 5,28 \cdot 10^{-4}}$$

$$\text{Re} = 2373,5 < 2500 \rightarrow \text{escoamento laminar.}$$

Admitindo que a radiação incide uniformemente sobre toda a superfície do tubo receptor, pode-se calcular o coeficiente de convecção no interior do tubo segundo as seguintes premissas:

- $\text{Pr} > 0,6$
- Escoamento laminar
- Condições completamente desenvolvidas
- q''_{conc} é praticamente uniforme ao longo e ao redor do tubo.

Então, de acordo com Incropera (1998), o coeficiente de troca de calor por convecção pode ser obtido de:

$$\text{Nu} = \frac{h D_{\text{receptor}}}{k} \Rightarrow h = \frac{\text{Nu} \cdot k}{D_{\text{receptor}}}$$

$$\text{Nu} = 4,36$$

$$h = \frac{4,36 \cdot 0,645}{0,0254} = 110,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

O perfil da parábola foi calculado partindo-se da equação:

$$y^2 = 2 \cdot p \cdot x$$

Onde p é a medida do parâmetro da parábola. Então,

$$f = \frac{p}{2}, \text{ ou}$$

$$p = 2 \cdot f$$

E,

$$y^2 = 4 \cdot f \cdot x$$

Que será a equação utilizada para gerar o perfil parabólico do concentrador.

Utilizando a largura B já calculada, é possível definir algumas medidas importantes do perfil:

$$B = 1,20 \text{ m}$$

$$y = \frac{1,20}{2} = 0,60 \text{ m}$$

Então, deseja-se o valor de x , para . É necessário também definir a altura do foco. Utilizando uma planilha de cálculo, é possível otimizar a escolha desta altura:

Tabela 2 - Cálculo da altura da calha

foco (cm)	x(cm)
5	180,00
10	90,00
15	60,00
20	45,00
25	36,00
30	30,00
35	25,71
40	22,50
45	20,00
50	18,00
55	16,36

→ escolhido

Se o foco ficar a uma altura muito superior à borda da calha, a mesma só refletirá os raios solares na parte inferior do tubo, em contrapartida, se o mesmo estiver muito próximo à origem, a calha deverá possuir uma altura muito grande, o que dificultaria sua construção, aumentaria custos e diminuiria a precisão geométrica. Com base nestes argumentos, um valor razoável para a altura do foco é o de 25 cm, que nos dá 36 cm de altura para a calha.

Segue um esquema com a indicação das principais dimensões.

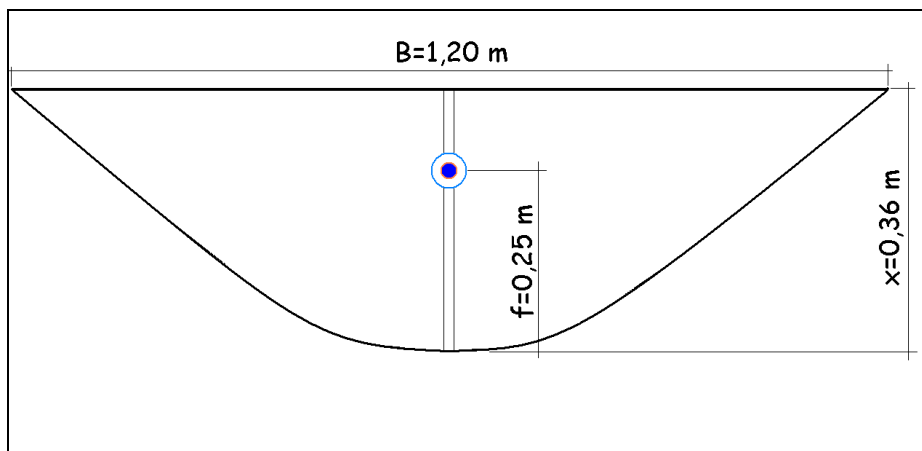


Figura 3 - Dimensões da Parábola

Abaixo segue um resumo com os resultados obtidos para o dimensionamento do equipamento:

- Principais Dimensões:
 - Largura da calha: 1,20 m
 - Comprimento da calha: 2,08 m
 - Altura da calha: 0,36 m
 - Altura do foco (posição do tubo absorvedor): 0,25 m
 - Diâmetro do tubo absorvedor: 1 pol
- Principais Condições de operação:
 - Temperatura média do reservatório: 60 °C
 - Vazão da água através do aquecedor: 90 L/h (0,025 kg/s)
 - Vazão média da água de alimentação da máquina de lavar: 0,005 kg/s
 - Temperaturas de parede na entrada e na saída do tubo receptor respectivamente: 110 °C e 125 °C aproximadamente
 - Temperatura da água de abastecimento considerada (ambiente): 25 °C
- Principais materiais:
 - Tubo absorvedor: cobre revestido com tinta preta fosca
 - Estrutura: Madeira
 - Superfície refletora: chapa de aço inoxidável 430 laminado
 - Tubulação: mangueiras de borracha
 - Reservatório: isopor

Segue abaixo uma figura que ilustra o equipamento básico projetado neste trabalho.

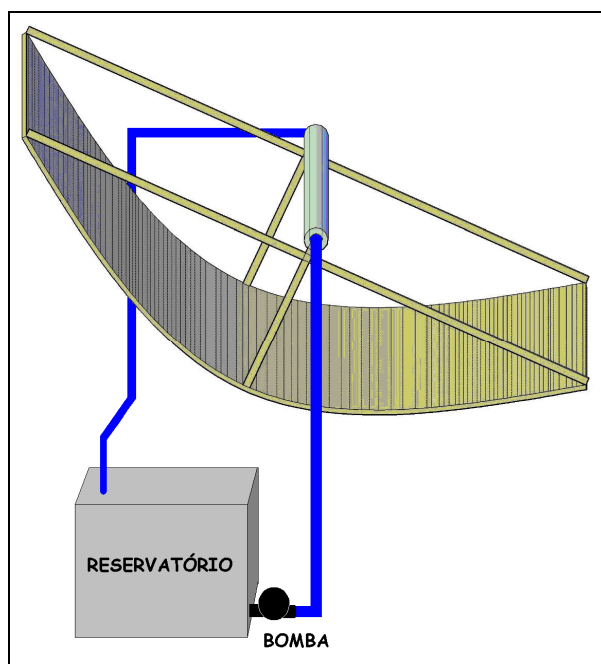


Figura 4 - Esquema da montagem do equipamento

Foi projetado também um sistema de tracking que é fundamental no funcionamento do equipamento; pois uma característica deste tipo de aquecedor solar é a de que há a necessidade de mantê-lo constantemente voltado para o sol, para garantir que os raios estejam incidindo sempre normalmente ao plano da borda da calha.

Este sistema de tracking movimentará o equipamento através do movimento de um timer analógico, que possui a velocidade angular necessária (1 revolução por dia).

3. Construção do protótipo

A etapa de construção do protótipo teve início no mês de julho com a cotação e compra de alguns materiais; serão apresentados a seguir os métodos que foram utilizados para a construção, materiais comprados, preços, considerações e problemas encontrados.

Os itens que foram comprados estão listados a seguir, com seus preços discriminados:

- Madeira: 1 chapa de 3.000x1500x10 (R\$60,00)
- Madeira: ripas de 50x10x4.000 e tábuas de 300x3.000x15 (R\$45,00)
- Tubo de cobre de 1 polegada com 2,00mx1mm (R\$56,00)
- 2 Chapas de aço inox 430 com 2.000x1.275x0.4 (R\$136,00)
- Geladeira de isopor (R\$20,00)
- Bomba de aquário 90L/h (R\$24,00)
- Conexões para tubulação (R\$25,00)
- Parafusos, Presilhas, Tinta preta e Mangueiras (R\$47,00)

O total gasto com o projeto foi de R\$ 413,00.

A metodologia da construção seguiu os seguintes passos:

- Impressão do perfil parabólico: O perfil foi desenhado com o auxílio de software CAD e plotado em escala 1:1 em folha A0 para garantir boa precisão durante a execução; o desenho serviu como gabarito para os cortes na madeira;
- Corte das tábuas utilizando as serras elétricas;
- Acabamento das peças cortadas com a lixadeira;
- Corte e acabamento das ripas da estrutura;
- União das peças da estrutura com parafusos e presilhas. Nas extremidades das peças transversais, foram utilizadas presilhas de plástico ao invés de parafusos, pois esta parte tem espessura muito pequena e caso fossem colocados parafusos, os mesmos rachariam a madeira;
- Corte das chapas de aço com a tesoura de jardinagem;

- Fixação das chapas de aço na estrutura com parafusos;
- Corte e acabamento do suporte do tubo;
- Pintura do tubo de cobre;
- Furação da geladeira de isopor e colocação das mangueiras com pasta de silicone;
- Montagem da tubulação, incluindo conexões e vedações.

Abaixo seguem algumas fotos do aquecedor pronto, e sendo ensaiado sob o sol:



Figura 5 – Equipamento montado sendo ensaiado



Figura 6 – Equipamento montado e sendo ensaiado

4. Ensaios

O protótipo ficou pronto no dia 08/11/2008, e os ensaios começaram no dia 09/11/2008, porém nesta data o clima estava nublado, e como será visto abaixo, os resultados para clima nublado não são satisfatórios. Ao todo foram realizados três ensaios, nos dias 09, 16 e 22 de novembro, sendo que nos dias 16 e 22 o clima estava bom, com céu sem nuvens e temperatura oscilando entre 23 °C às 9:00 hs, 27 °C às 13:00 hs e 25 °C às 16:00 hs no dia 16 e 24 °C, 27 °C e 25 °C para os mesmos horário no dia 22.

5. Resultados obtidos

Para a medição das temperaturas, foi utilizado um termômetro simples, do tipo normalmente empregado em piscinas e aquários, com escala de 0 °C até 70 °C. a precisão do instrumento é de 0,5 °C. Não foi escolhido um termômetro mais preciso por razões de custo, pois enquanto este termômetro custou R\$ 14,00, o modelo com precisão de 0,1 °C e escala de que vai até 300 °C custaria R\$65,00.

Com os dados coletados foi possível plotar os gráficos de Temperatura x Tempo:

Gráfico para o primeiro dia de ensaio (clima nublado):

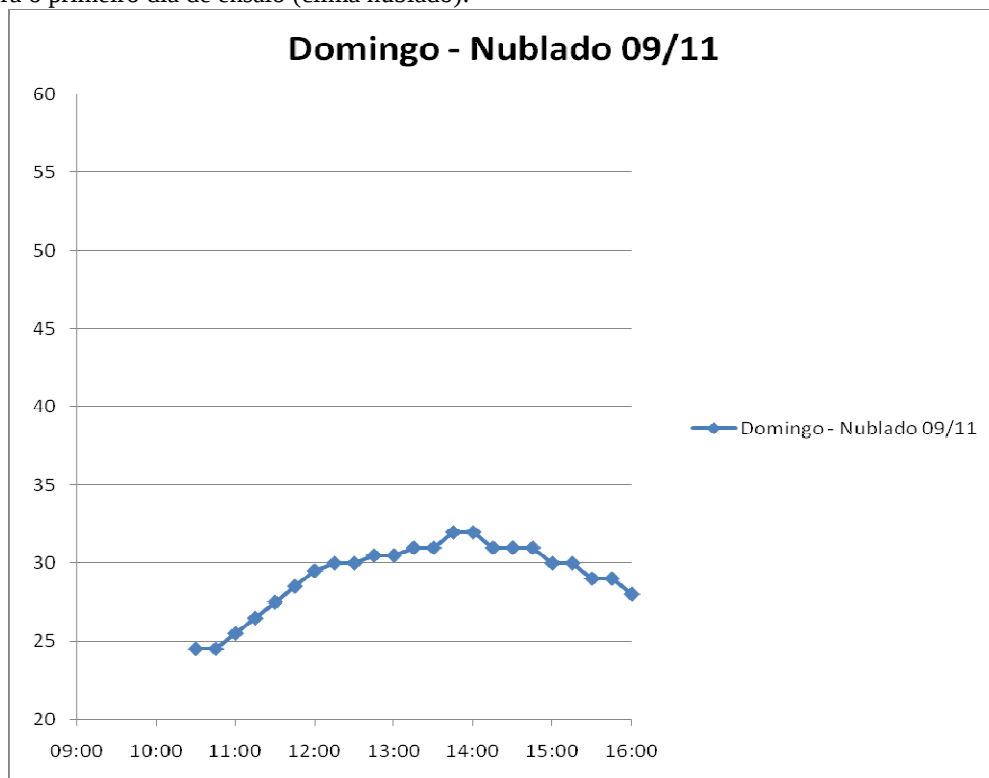


Figura 6 – Comportamento da temperatura da água no reservatório em dia nublado

Gráfico para o segundo dia de ensaio:

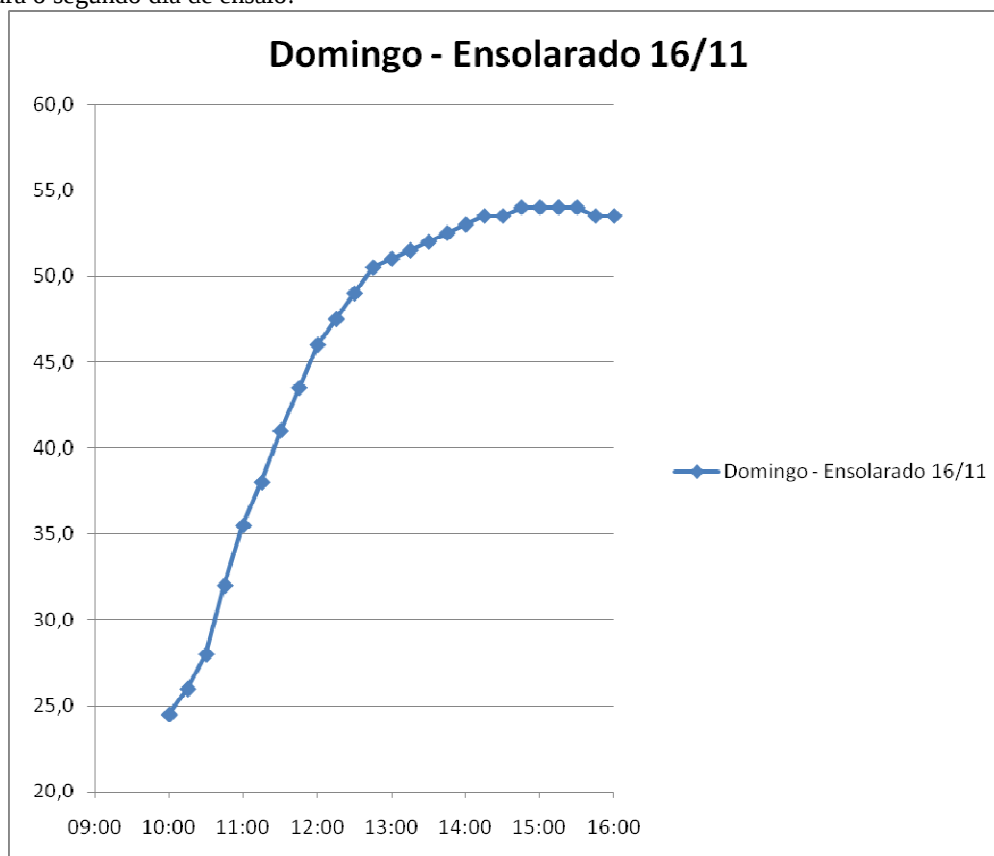


Figura 7 – Comportamento da temperatura da água no reservatório em dia ensolarado

Gráfico para o terceiro dia de ensaio:

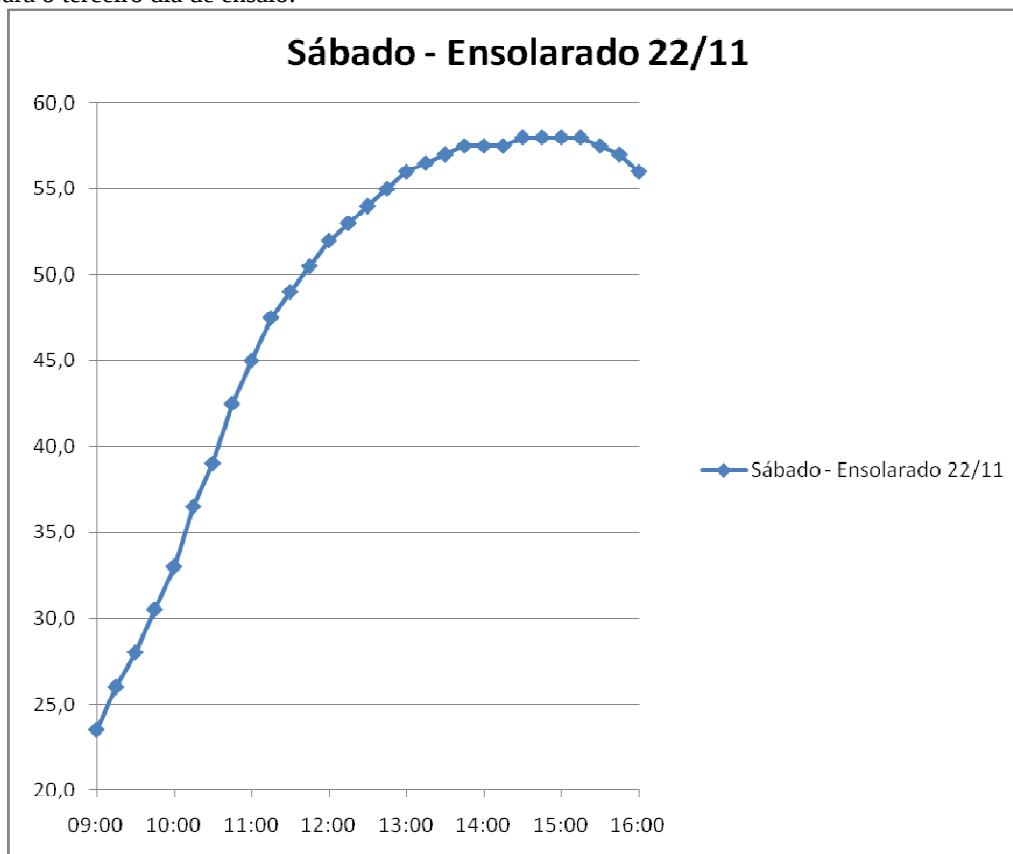


Figura 8 – Comportamento da temperatura da água no reservatório em dia ensolarado

6. Análise dos Resultados

Como se pode verificar, nos dias ensolarados a temperatura se aproxima da estabilidade após cerca de 2 a 3 horas de exposição. Atingindo picos em torno de 55 °C. Há fatores a se levar em conta nestes resultados; pois como o aquecedor foi projetado para uma temperatura de 60 °C, o resultado obtido não está discrepante se considerarmos que não está sendo utilizado o tubo de vidro isolante. Um outro fator que influi nesta diferença é a eficiência da superfície refletora, que foi considerada 90% para os cálculos, porém esta deve possuir um valor inferior a este na realidade, principalmente em razão das imperfeições construtivas, uma vez que a superfície foi feita sem auxílio de equipamentos mais sofisticados como máquinas CNC e medições com precisão milimétrica.

Para a utilização no restaurante – como projetado – assumindo que o mesmo seria utilizado com o tubo de vidro isolante, considera-se viável; contanto que se inicie a exposição ao sol com certa antecedência antes de se iniciar a retirada de água quente do reservatório para que se atinja o equilíbrio e a quantidade de calor recebida seja suficiente para manter a temperatura do reservatório.

7. Comentários e Conclusões

É possível perceber através das pesquisas realizadas que há um grande potencial não explorado para a utilização de aquecimento por energia solar no Brasil; existem poucas empresas especializadas no assunto e, as que existem são empresas regionais, de pequena escala e voltadas para o seletor mercado residencial de alto padrão. É menor ainda a utilização de equipamentos de aquecimento de água por energia solar no setor comercial, como restaurantes, hospitais e lavanderias.

Portanto, não só exercitaram-se os conhecimentos de Transferência de Calor, Termodinâmica, Ótica e Fabricação Mecânica, como também estão sendo aplicados tais conhecimentos em um projeto que consiga envolver desenvolvimento sustentável, simplicidade e viabilidade econômica.

Com relação aos resultados obtidos, o aluno os considera satisfatórios dadas as condições climáticas nos dias de ensaio, que tiveram temperaturas inferiores às de típicos dias de verão.

Para efeito de curiosidade, foi feito também um teste do concentrador sob o sol sem a circulação de água, somente com ar dentro, na etapa em que a tubulação ainda não estava pronta; o termômetro foi inserido no tubo e rapidamente atingiu sua temperatura máxima de 70 °C. Como não se dispunha de outro termômetro para continuar a medição a temperaturas mais elevadas, o aluno colocou uma gota de água sobre o tubo e verificou que a mesma ferveu, o que o levou a crer que a temperatura naquele momento estava em torno de 100 °C.

8. Referências

BEZERRA, A.M.; Aplicações Térmicas da Energia Solar; UFPB/Editora Universitária; João Pessoa; 1998.

Duffie, John A.; Beckman, Willian A.; Solar Engineering Of Thermal Processes, 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc; New York, 1991.

Incropera, F.P.; Dewitt, D.P.; Fundamentos de Transferência de Calor e Massa, LTC Editora; Rio de Janeiro, 1998.

Kreider, j.f.; kreith, f A.; Solar Heating and Cooling, McGraw Hill; Washington, 1996.

Robinson, n.; Solar Radiation; Elsevier Publishing Company; Amsterdam, 1970.

Project and Construction of a Concentrator Solar Heater

Bruno Boule Matrai

brunoboule@hotmail.com

Abstract. This work presents elements for the project of a solar concentrator heater. The main targets of the text is to present the theoretical fundaments, assumptions, calculations, materials and methods in order to effectively manufacture a prototype. During its development, topics from Fundaments of Heat and Mass Transfers, Optics and Thermodynamics. Also, some principles of Material selection processes are applied.

Keywords. heater, concentrator, solar, energy