

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM AQUECEDOR SOLAR CONCENTRADOR

Bruno Boulle Matrai

**São Paulo
2008**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM AQUECEDOR SOLAR CONCENTRADOR

**Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia**

Bruno Boulle Matrai

Orientador: Eitaro Yamane

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**São Paulo
2008**

FICHA CATALOGRÁFICA

Matrai, Bruno Boulle

Projeto e Construção de um Aquecedor Solar Concentrador, por B. B. Matrai. São Paulo: EPUSP, 2008. 64 p.

Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica

1. Aquecedor 2. Solar 3. Concentrador 4. Água 5. Parabólico 6. Energia |. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica ||. t.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha família que me apoiou e aturou a bagunça na garagem que perdurou por seis meses.

Um forte agradecimento ao professor orientador Eitaro, que teve a paciência de me corrigir e indicar os caminhos para o desenvolvimento do projeto.

Um agradecimento especial à minha irmã que me auxiliou na construção do protótipo, lixando, desenhando e pintando.

Agradeço também à minha namorada Clarissa que efetuou um imprescindível trabalho de revisão gramatical no meu texto, além de ter me apoiado não só ao longo do desenvolvimento deste trabalho, mas também ao longo de minha graduação.

E finalmente, agradeço a todos os meus colegas e amigos pelos palpites, debates e soluções propostas.

Certamente todas essas pessoas fizeram enorme diferença no desenvolvimento e no resultado deste trabalho e a elas sou profundamente grato.

RESUMO

O presente trabalho 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.

ABSTRACT

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

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	Motivação	2
1.2	Energia Solar	2
1.3	Radiação Solar	3
2	OBJETIVOS	5
2.1	Aplicação	6
3	DEFINIÇÃO DA FORMA CONSTRUTIVA	7
4	CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO SOLAR	9
4.1	A Constante Solar	9
4.2	Emissão de Corpo Negro	10
5	MATERIAIS SELETIVOS	15
5.1	O Produto $\tau\alpha$	18
6	PARÂMETROS INICIAIS DO PROJETO	21
7	DIMENSÕES E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	23
7.1	Dimensões Principais	23
7.2	Coefficiente de convecção interno (tubo receptor)	26
7.3	Temperaturas de parede	27
8	O PERFIL PARABÓLICO	29
9	PERDAS NA REGIÃO ANULAR	32
10	SISTEMA DE TRACKING	35
11	MATERIAIS E MÉTODOS	40
12	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	41
13	RESULTADOS	49
14	ANÁLISE DOS RESULTADOS	54
15	COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	55
16	BIBLIOGRAFIA	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

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.

1.2 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.

1.3 Radiação Solar

Além das condições atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar etc.), a disponibilidade de radiação solar, também denominada energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano). Isso se deve à inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente (movimento de rotação) e à trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol (translação). Desse modo, a duração solar do dia – período de visibilidade do Sol ou de claridade – varia, em algumas regiões e períodos do ano, de zero hora (Sol abaixo da linha do horizonte durante o dia todo) a 24 horas (Sol sempre acima da linha do horizonte). As variações são mais intensas nas regiões

polares e nos períodos de solstício. O inverso ocorre próximo à linha do Equador e durante os equinócios.

A maior parte do território brasileiro está localizada relativamente próxima da linha do Equador, de forma que não se observam grandes variações na duração solar do dia. Contudo, a maioria da população brasileira e das atividades socioeconômicas do país se concentra em regiões mais distantes do Equador. Em Porto Alegre, capital brasileira mais meridional (cerca de 30° S), a duração solar do dia varia de 10 horas e 13 minutos a 13 horas e 47 minutos, aproximadamente, entre 21 de junho e 22 de dezembro, respectivamente. Desse modo, para maximizar o aproveitamento da radiação solar, pode-se ajustar a posição do coletor ou painel solar de acordo com a latitude local e o período do ano em que se requer mais energia. No Hemisfério Sul, por exemplo, um sistema de captação solar fixo deve ser orientado para o Norte, com ângulo de inclinação similar ao da latitude local.

No capítulo 4 será conduzido um estudo mais detalhado das características da Radiação Solar.

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. Entre meados e final dos anos 1980, foram instalados nove sistemas parabólicos no sul da Califórnia, EUA, com tamanhos que variam entre 14 MW e 80 MW, totalizando 354 MW de potência instalada. Trata-se de sistemas híbridos, que operam com auxílio de gás natural, de modo a atender a demanda em horários de baixa incidência solar. Os custos da eletricidade gerada têm variado entre US\$ 90 e US\$ 280 por MWh. Recentes melhoramentos têm sido feitos, visando reduzir custos e aumentar a eficiência de conversão. Por exemplo, no lugar de espelhos de vidro, têm-se empregado folhas circulares de filme plástico aluminizado, que possuem um peso bem inferior, facilitando a movimentação do sistema de tracking.

2.1 Aplicação

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), por ser caseiro e de pequena escala, este 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.

3 DEFINIÇÃO DA FORMA CONSTRUTIVA

Existem dois tipos de concentradores solares, o do tipo “prato” e o do tipo “calha”; o primeiro é similar a uma antena parabólica convencional, possui uma superfície refletora côncava que reflete a luz solar incidente num único ponto, o foco. Sua aplicação em geral está ligada à produção de vapor a temperaturas da ordem de 800°C. O segundo, do tipo “calha”, consiste em uma superfície refletora em forma de calha, com um perfil parabólico, que reflete a radiação solar em seu foco, onde será posicionado o tubo condutor da água. As figuras 1 e 2 mostram exemplos da forma construtiva de cada um deles:



Figura 1 - Exemplo de concentrador solar do tipo "prato" utilizado para aquecer uma panela.



Figura 2 - Exemplo de um concentrador solar do tipo "calha" utilizado para aquecer água.

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:

$$C = \frac{A_{refletor}}{A_{receptor}} .$$

Onde $A_{receptor}$ é a área do tubo a ser aquecido, e $A_{refletor}$ a área plana projetada da superfície elíptica refletora.

4 CARACTERÍSTICAS DA RADIAÇÃO SOLAR

4.1 A Constante Solar

A radiação emitida pelo Sol, e a geometria da relação Sol-Terra (distância média e diâmetros) resultam em uma intensidade de radiação aproximadamente constante que passa pela área de seção perpendicular à direção da propagação da radiação ao longo da distância média entre o Sol e a Terra.

Foram encontrados diversos valores para a constante solar, porém todos próximos a:

$$G_{sc} = 1367 \frac{W}{m^2}$$

Tal valor desconsidera as perdas na atmosfera, e após pesquisa bibliográfica, verificou-se que no Brasil, a média de irradiação varia de 400 a 900W/m² (como pode ser visto na figura 3). Para este trabalho, será utilizado o valor de 900 W / m², pois como será visto mais adiante, o horário de funcionamento do equipamento será o horário de maiores picos de incidência solar.

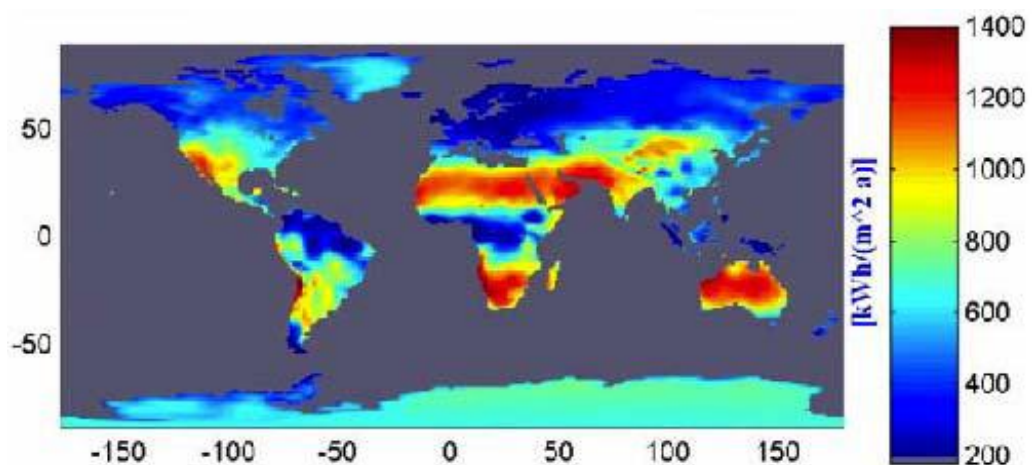


Figura 3 - Mapa da distribuição de radiação solar no mundo.

4.2 Emissão de Corpo Negro

Quando um corpo é submetido à radiação eletromagnética, ele pode absorver, refletir ou transmitir esta radiação. Os corpos que possuem a característica de não transmitir a radiação, são denominados corpos opacos.

O espectro eletromagnético corresponde a todos os comprimentos de onda presentes na radiação eletromagnética; a figura 4 mostra a relação entre as faixas de comprimentos de onda e suas denominações.

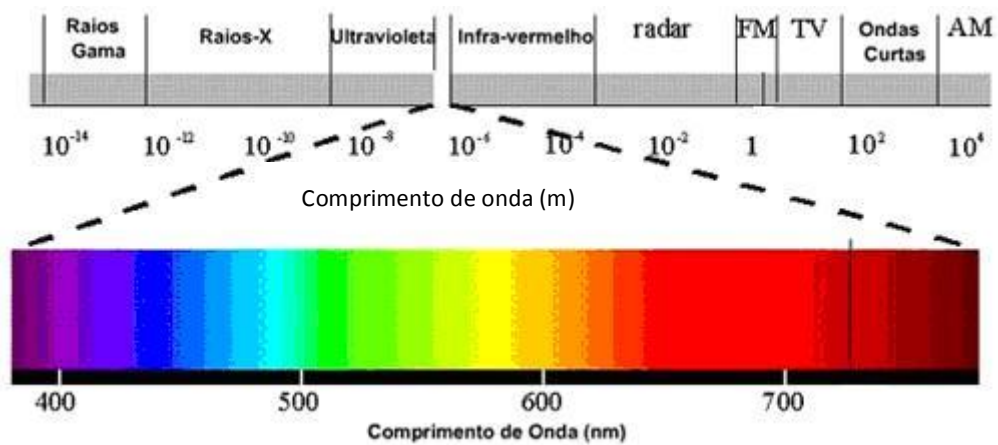


Figura 4 - Espectro Eletromagnético

A energia incidente por unidade de tempo e comprimento de onda é chamada de fluxo espectral incidente, $F_{\lambda A}^{(i)}$ e, da mesma forma, denominam-se os fluxos espectrais absorvido e refletido $F_{\lambda A}^{(a)}$ e $F_{\lambda A}^{(r)}$, respectivamente. O fluxo total, que considera todos os comprimentos de onda do espectro, é dado por:

$$F = \int_0^{\infty} F_{\lambda A} d\lambda$$

Definindo a absorvidade espectral a_λ e a refletividade espectral r_λ da superfície do corpo por:

$$a_\lambda = \frac{F_{\lambda A}^{(a)}}{F_{\lambda A}^{(i)}} \text{ e,}$$

$$r_\lambda = \frac{F_{\lambda A}^{(r)}}{F_{\lambda A}^{(i)}}$$

No caso de o corpo ser opaco, o que não é absorvido pela superfície deve ser refletido, portanto:

$$a_\lambda + r_\lambda = 1$$

Na prática, sabe-se que não existe um corpo negro perfeito (refletividade nula), ou uma superfície perfeitamente refletora (absorvidade nula), portanto surge a denominação de corpo opaco, que é qualquer corpo cuja absorvidade está abaixo da de corpo negro e acima de zero:

$$a_\lambda = a \text{ (para todo } \lambda \text{), com } 0 < a < 1$$

Portanto, é convencional que corpos que possuem uma refletividade muito baixa (ou uma absorvidade alta) podem ser chamados de corpos negros. Valores de a em torno de 0,97 são encontrados para corpos considerados negros, e tem-se que para a prata polida, que é o material de maior refletividade, $a=0,07$.

A refletividade e a absorvidade variam consideravelmente de acordo com o comprimento de onda do fluxo radiante incidente. Muitos pigmentos podem ser enxergados como brancos para o olho humano, por refletirem bem no espectro visível, porém podem ser excelentes absorvedores de radiação infra-vermelha.

Quando a radiação é emitida de forma oblíqua sobre a superfície do corpo, há uma mudança de suas características; em geral, quanto maior o ângulo de

incidência, menor é a eficiência de absorção da superfície. Neste trabalho, serão desconsiderados tais efeitos, e consideraremos que a superfície é um absorvedor isotrópico.

O fluxo térmico emitido por um corpo é dado por:

$$W_{\lambda} = \epsilon_{\lambda} \cdot W_{B,\lambda}(T)$$

Onde ϵ_{λ} é a emissividade espectral e $W_{B,\lambda}(T)$ é a chamada potência emissiva monocromática de um corpo negro, e é dada por:

$$W_{B,\lambda}(T) = \frac{2\pi h c_0^2}{n^2 \lambda^5 \cdot \exp\left(\frac{hc_0}{n\lambda kT} - 1\right)}$$

Onde:

$$h \text{ (constante de Planck)} = 6,6252 \times 10^{-16} \frac{J}{s}$$

$$c_0 \text{ (velocidade da luz)} = 2,9979 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

$$k \text{ (constante de Boltzman)} = 1,3806 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$$

O fluxo total de radiação emitido pela superfície é dado pela Lei de Stefan-Boltzman:

$$W_B(T) = \int_0^{\infty} W_{B,\lambda} d\lambda = n^2 \sigma T^4$$

$$\text{Onde } \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c_0^2 h^3} = 4,88 \times 10^{-8} \frac{kcal}{m^2 h K^4} = 5,67 \times 10^{-12} \frac{N}{cm^2 K^4}$$

Pela Lei de Kirchhoff, sabe-se que a emissividade espectral é igual à sua absorvidade espectral:

$$\epsilon_{\lambda} = a_{\lambda}$$

Então, para o corpo negro, a equação fica:

$$F_{\lambda,CN} = W_{B,\lambda}(T)$$

Esta é chamada função de Planck.

Já um corpo cinzento emite radiação segundo a equação:

$$F_{\lambda,CC} = \epsilon \cdot W_{B,\lambda}(T) \text{ , com } 0 < \epsilon < 1$$

A figura 5, mostra a função de Planck como função do comprimento de onda para diferentes temperaturas. Note que cada curva possui um ponto de máxima potência emissiva, chamamos de $\lambda_{\max}$ o comprimento de onda que corresponde à máxima potência emissiva a uma determinada temperatura.

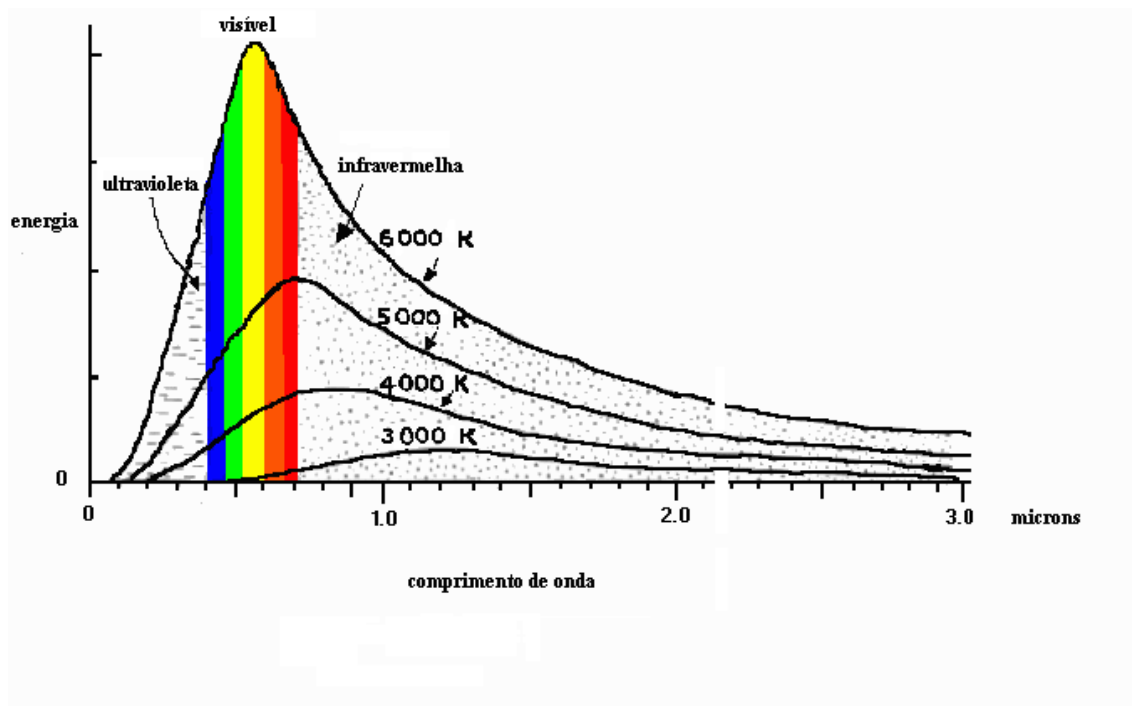


Figura 5 - Espectro de emissão térmica a diferentes temperaturas

Pode-se mostrar que a seguinte propriedade de $W_{B,\lambda}$ é válida (Lei de Wien):

$$\lambda_{\max} \cdot T = \alpha \text{ (constante)}$$

$$\text{Onde } \alpha = 2898 \mu m K$$

E, pela Lei de Stefan-Boltzman:

$$\int_0^{\infty} W_{B,\lambda} d\lambda = \sigma T^4$$

$$\text{Onde } \sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{N}{m^2 K^4}$$

As constantes α e σ são as constantes de Stefan-Boltzman.

Então o fluxo total de radiação emitido por um corpo negro deriva da Lei de Stefan-Boltzman:

$$F_{CN} = W_B(T) = \sigma T^4$$

Vê-se que a emissão do corpo negro aumenta substancialmente quando há um aumento na temperatura.

Analogamente, para um corpo cinzento, teremos:

$$F_{CC} = \epsilon \cdot W_B(T) = \epsilon \sigma T^4, \text{ com } 0 < \epsilon < 1$$

5 MATERIAIS SELETIVOS

A superfície absorvedora do concentrador solar deve ter alta absorvidade para radiação no espectro da radiação solar; e ao mesmo tempo, é desejável que tenha sua radiação térmica minimizada, a fim de se diminuir as perdas de calor para a atmosfera.

Considerando a temperatura de trabalho do concentrador deste projeto sendo menor que 200 °C, e sabendo que a temperatura do Sol é da ordem de 6000 K, verifica-se que a faixa de comprimentos de onda emitidos pela superfície absorvedora possui somente um pequeno trecho em comum com o espectro da radiação solar; o que significa, em outras palavras, que é possível criar uma superfície com comportamento “cinzento” no espectro solar e ao mesmo tempo com baixa emissividade de longo comprimento de onda. Esta superfície é chamada de superfície seletiva.

Esta superfície seletiva pode também ser chamada de superfície semi-cinzenta, pois pode ser considerada cinzenta para o espectro solar (comprimentos de onda menores do que aproximadamente $3\mu m$), e com propriedades diferentes no espectro infravermelho (λ maiores do que $3\mu m$). Neste caso, diz-se que o comprimento de onda que delimita as duas regiões é o comprimento de onda de corte (λ_c).

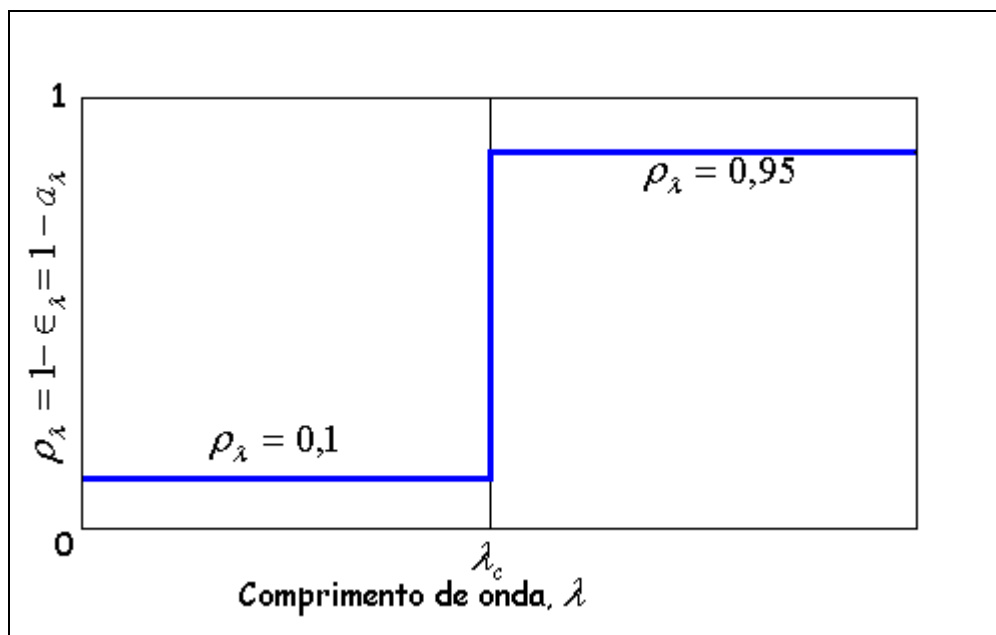


Figura 6 - Comportamento de um material seletivo ideal

A figura 6 mostra o comportamento ideal de um material seletivo hipotético.

Para uma superfície opaca, ρ_λ é muito pequeno e, $a_\lambda = 1 - \rho_\lambda$, é bem próxima de 1; então, em comprimentos de onda acima de λ_c , a refletividade é quase unitária, e assim, a emissividade ($\epsilon_\lambda = a_\lambda = 1 - \rho_\lambda$) é quase nula.

A determinação da absorvidade da energia solar e da refletividade da radiação de longo comprimento de onda é realizada pela integração da refletividade monocromática sobre uma faixa espectral apropriada. Para concentradores solares como o deste trabalho (temperaturas abaixo de 200°C), as temperaturas serão sempre baixas o suficiente para que as energias emitam essencialmente comprimentos de onda maiores do que $3\mu m$.

Uma das maneiras mais usuais para a obtenção de uma superfície seletiva é através da aplicação de uma cobertura de alta absorvidade para radiação solar sobre um substrato bom condutor de calor; isto permite que a cobertura absorva bem a energia solar enquanto o substrato conduz com eficiência o calor para dentro da superfície.

Usualmente, coberturas de metal-óxido e substratos metálicos são empregados para a obtenção de tais efeitos; por exemplo, óxido de cobre em alumínio, óxido de cobre em cobre e sulfeto de níquel sobre ferro galvanizado.

A absorvidade das coberturas pode aumentar com a adoção de técnicas mais avançadas baseadas em fenômenos de interface; porém pode ocorrer que muitos desses materiais apresentem altos índices de reflexão, e assim reflitam parte da energia solar. Essa perda por reflexão pode ser reduzida com coberturas secundárias anti-reflexivas.

Sabe-se que estes materiais seletivos possuem alto custo, principalmente devido aos processos envolvidos em sua fabricação; como a eletrodeposição. Tendo em vista que o objetivo deste trabalho é atingir eficiências razoáveis gastando-se o mínimo de recursos, uma alternativa usual para que se consiga um comportamento seletivo do tubo receptor do concentrador, é aplicando uma cobertura de tinta preta fosca. Para materiais assim, o comportamento é similar ao mostrado na figura 7.

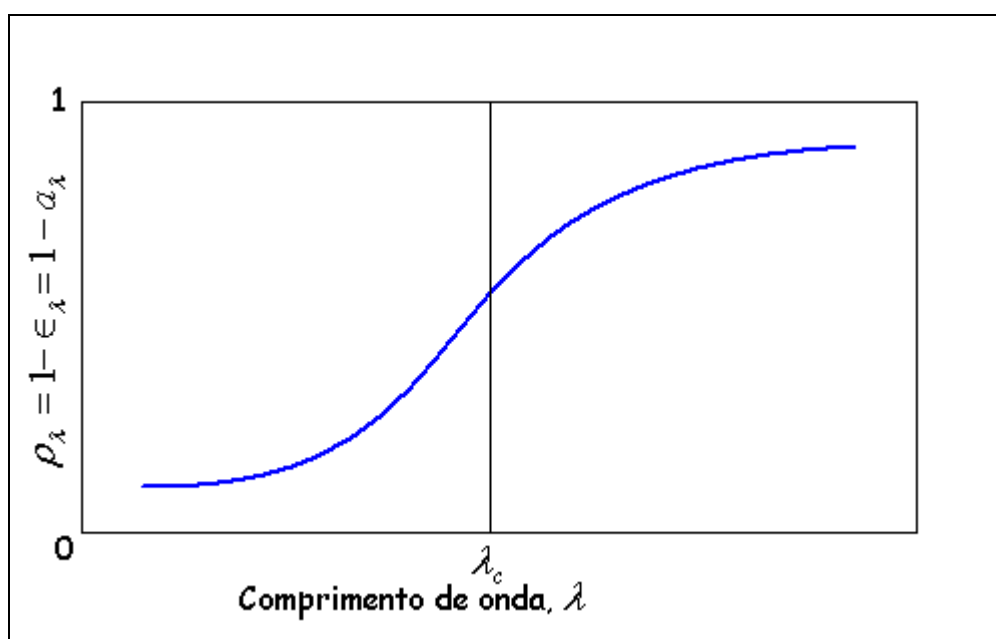


Figura 7 - Comportamento de material seletivo de baixo custo

Note que não existe, para este material, um comprimento de onda de corte específico, esta transição se dá de forma gradual, ocasionando perdas maiores.

No caso deste projeto, onde o tubo receptor é coberto com uma camada de tinta preta, recomenda-se a utilização de cobre ou alumínio, que possuem boa

condutibilidade térmica. O cobre possui condutibilidade térmica um pouco superior à do alumínio, embora seu custo seja um pouco maior. Para este projeto, escolheu-se empregar um tubo de cobre na fabricação do tubo receptor.

5.1 O Produto $\tau\alpha$

Conforme visto anteriormente, a radiação solar possui pequeno comprimento de onda, ao contrário da radiação emitida por um corpo que foi aquecido a uma dada temperatura. À partir disto, nota-se a importância de se observar se as propriedades que estão sendo utilizadas se referem à faixa do espectro correta.

Precisamos agora garantir que a radiação solar não sofra grandes perdas ao passar pela cobertura de vidro e incidir sobre o tubo receptor. Portanto é preciso determinar a transmissividade (τ), a absorvidade (α) e a reflexividade (ρ) do vidro.

A absorção da radiação em um meio transparente é descrita pela Lei de Bouger, que tem como base a suposição de que a radiação absorvida é proporcional à intensidade local do meio e à distância x que a radiação tem que atravessar no meio.

$$dI = -IKdx$$

Onde K é a constante de proporcionalidade, ou coeficiente de extinção, assumido constante no espectro solar.

Sendo θ_1 e θ_2 os ângulos de incidência e refração, respectivamente, integrando-se a equação acima ao longo do comprimento percorrido pela radiação, teremos:

$$\tau_a = \frac{I_{transmitida}}{I_{incidente}} = \exp\left(-\frac{K \cdot t}{\cos(\theta_2)}\right)$$

O índice a indica que somente a perda por absorção está sendo considerada.

Para o vidro, o valor de K varia de aproximadamente $4m^{-1}$ para o vidro “água branca”, até $32m^{-1}$ para o vidro “verde”.

Para obter τ , α e ρ , podemos utilizar com boa aproximação as seguintes equações (segundo Duffie (1991)):

$$\begin{aligned}\tau &\cong \tau_a \cdot \tau_r \\ \alpha &\cong 1 - \tau_a \\ \rho &\cong \tau_a (1 - \tau_r)\end{aligned}$$

Onde:

$$\begin{aligned}\tau_r &= \frac{1-r}{1+r} \\ r &= \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}\end{aligned}$$

Para o vidro, o índice de refração médio para o espectro solar é: $n_{\text{vidro}}=1,526$; a espessura do vidro é de $t=2,5\text{mm}$; e, utilizaremos ângulo de incidência de 90° com relação à superfície. Então obtemos:

$$\begin{aligned}\tau_a &= 0,990 \\ \tau_r &= 0,917\end{aligned}$$

Então:

$$\begin{aligned}\tau &\cong \tau_a \cdot \tau_r = 0,908 \\ \alpha &\cong 1 - \tau_a = 0,010 \\ \rho &\cong \tau_a (1 - \tau_r) = 0,082\end{aligned}$$

Isto significa que o vidro em questão possui alta transmissividade, baixa refletividade e baixa absorvidade; mostrando ser uma boa opção na presente aplicação.

Uma vez definida a forma com que será obtida a característica de seletividade, é necessário estimar a parcela da radiação incidente que será absorvida pela tinta preta que revestirá o tubo receptor. Tal estimativa é obtida através do produto $\tau\alpha$, que é dado por:

$$P_{\tau\alpha} = \frac{\tau \cdot \alpha_{tinta}}{[1 - (1 - \alpha_{tinta}) \cdot \rho_d]}$$

Sendo a refletividade da tinta para radiação dada por:

$$\rho_d = \tau_a(60^\circ) - \tau(60^\circ) = 0,16$$

Para tinta comum (comercial), temos $\alpha_{tinta} = 0,85$

Portanto:

$$P_{\tau\alpha} = \frac{\tau \cdot \alpha_{tinta}}{[1 - (1 - \alpha_{tinta}) \cdot \rho_d]} = \frac{0,908 \cdot 0,85}{[1 - (1 - 0,85)0,16]} = 0,791$$

Ou seja, o tubo receptor absorverá cerca de 79,1% da energia solar refletida pelo concentrador.

6 PARÂMETROS INICIAIS DO PROJETO

Pretende-se testar o protótipo em duas situações, em circuito aberto, medindo-se as temperaturas de entrada e saída, e em circuito fechado através da utilização de um reservatório; no entanto, o aquecedor será projetado para a condição de vários passes, ou seja, circuito fechado.

O sistema de aquecimento será composto de: reservatório, calha refletora e estrutura, tubo metálico a ser aquecido, tubo de vidro isolante, bomba d'água e tubulação. Um esquema da instalação pode ser visto na figura 8.

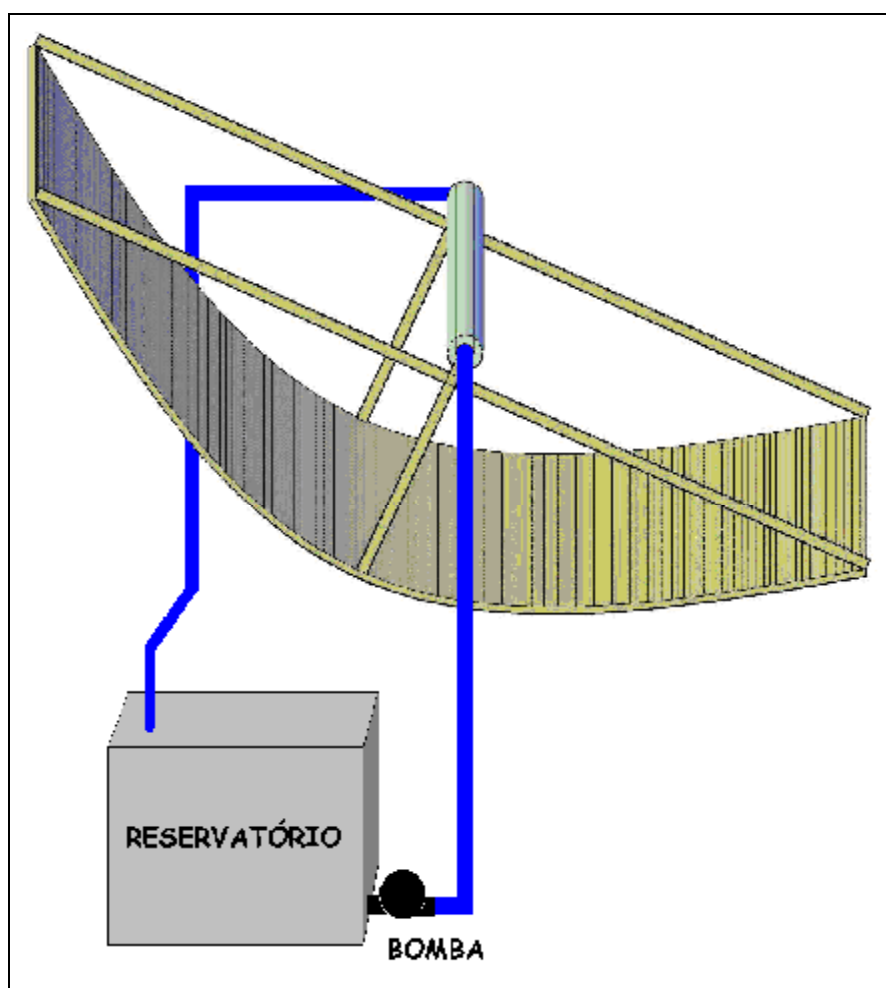


Figura 8 - Esquema da Instalação

Dada a restrição de gastos do projeto, deve-se iniciar a seleção de alguns materiais que podem ser limitantes como parâmetros de projeto: por exemplo, na

aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica, é preciso saber qual a vazão do sistema, e para tal, é interessante verificar as vazões de bombas disponíveis no mercado. Portanto é necessário definir alguns parâmetros e fixá-los para então desenvolver o projeto do equipamento.

Tomando 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.

7 DIMENSÕES E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

7.1 Dimensões Principais

O funcionamento do equipamento se dará da seguinte maneira: inicialmente, a água estará a 25°C no reservatório, e começará a circular através do concentrador até atingir uma temperatura média de 60°C; que é a temperatura normal de operação do equipamento (condição de equilíbrio); porém é óbvio que haverá perdas de calor constantemente tanto na tubulação de transporte quanto no próprio reservatório e também, haverá uma entrada de água a uma temperatura de 25°C (ambiente) à vazão de 0,004 kg / s, afinal esta é a vazão de água quente que será consumida pela máquina de lavar.

A vazão da bomba que circulará a água pelo concentrador é de 0,025 kg / s, tal vazão foi escolhida devido à disponibilidade de bombas d'água no mercado; foi escolhido utilizar bombas de aquário de pequeno porte.

A seguir, serão definidas algumas premissas objetivando simplificar o projeto:

- Assumiremos que as perdas de calor na tubulação que leva a água do reservatório para o concentrador representam uma queda de 5°C na temperatura da água; o que nos dá uma perda de calor de aproximadamente:

$$q' = \dot{m}_{bomba} \cdot c_p (\Delta T) = 0,025 \cdot 4182 \cdot 5 = 522,75W$$

- Assumiremos que as perdas de calor na tubulação que leva a água do concentrador para o reservatório representam uma queda de 5°C na temperatura da água; o que nos dá uma perda de calor de aproximadamente:

$$q' = \dot{m}_{bomba} \cdot c_p (\Delta T) = 0,025 \cdot 4182 \cdot 5 = 522,75W$$

- O reservatório possui uma capacidade de 30 litros de água e será considerado um recipiente isotérmico;
- Como temos água a 25°C entrando a 0,004 kg/s e temos água a 60°C saindo a 0,004 kg/s, consideraremos esta situação como uma perda de calor pontual equivalente a:

$$q' = \dot{m}_{lavadora} \cdot c_p (T_{média} - T_{ambiente})$$

$$q' = 0,004 \cdot 4182(60 - 25) = 585,48W$$

Temos que a quantidade de calor necessária para o aquecimento é dada pela soma de todas as perdas de energia que ocorrem no sistema:

$$q'_{conc} = 585,48 + 522,75 + 522,75 = 1630,98W$$

Porém, definindo um volume de controle que compreende todo o tubo receptor, e aplicando a Primeira Lei da Termodinâmica, sabendo a quantidade de calor que está sendo fornecida a ele, podemos calcular a diferença das temperaturas médias de entrada e saída do tubo receptor:

$$q'_{conc} = \dot{m}_{H_2O} \cdot c_p \cdot (\Delta T)$$

Onde:

q'_{conc} é a quantidade de energia recebida pelo tubo receptor, em W

$\dot{m}_{H_2O}$ é a vazão mássica de água no interior do tubo receptor, (0,025 kg/s)

c_p é o calor específico da água, que vale 4182 J/kg.K

ΔT é a variação da temperatura média da água entre a entrada e a saída do tubo receptor.

Substituindo:

$$q'_{conc} = 1630,98 = 0,025 \cdot 4182 \cdot \Delta T \rightarrow \Delta T = 15,6^\circ C$$

Considerando o período de funcionamento de um restaurante em horário de almoço das 11:00hs às 15:00hs, a média de irradiação solar neste horário é de aproximadamente 900 W / m^2 (como explicado no capítulo 4). E, como calculado anteriormente, sabemos que o tubo receptor absorverá cerca de 79,1% da energia solar refletida pelo concentrador.

Consideraremos que a eficiência da superfície refletora é de 90%, ou seja, 90% dos raios que a atingirem, serão direcionados ao conjunto tubo de vidro + tubo receptor. Portanto, teremos que a quantidade de calor absorvida pelo tubo receptor será:

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

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 $2,5 \text{ m}^2$ 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

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

É 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 ($l=L$):

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

7.2 Coeficiente de convecção interno (tubo receptor)

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

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

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

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:

- $Pr > 0,6$
- 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:

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

$$Nu = 4,36$$

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

7.3 Temperaturas de parede

Tendo em mãos o coeficiente de troca de calor por convecção, é possível calcular as temperaturas de parede na entrada e na saída do tubo receptor.

A taxa de troca de calor por unidade de área no tubo é de:

$$q''_{conc} = 640,71 \cdot C = 640,71 \cdot 15,06 = 9649,1 \frac{W}{m^2}$$

E, pela equação de troca de calor por convecção:

$$q''_{conc} = h \cdot (T_p - T_m)$$

Onde T_p é a temperatura da parede interna do tubo e, T_m a temperatura de mistura do fluido, ambas referentes à mesma seção transversal.

Na seção de entrada:

$$T_{p,e} = \frac{q''_{conc}}{h} + T_{m,e} = \frac{9649,1}{110,7} + \left(\frac{60 - 15,6}{2} \right) = 109,36^\circ C = 382,36 K$$

E na seção de saída:

$$T_{p,s} = \frac{q''_{conc}}{h} + T_{m,s} = \frac{9649,1}{110,7} + \left(\frac{60 + 15,6}{2} \right) = 124,96^\circ C = 397,96 K$$

Assim, a temperatura da parede interna média é dada por:

$$\bar{T}_p = \frac{T_{p,e} + T_{p,s}}{2} = \frac{109,36 + 124,96}{2} = 117,16^\circ C = 390,16 K$$

8 O PERFIL PARABÓLICO

Considerando no plano cartesiano xOy , uma reta d (diretriz) e um ponto fixo F (foco) pertencente ao eixo das abscissas (eixo dos x), conforme figura abaixo:

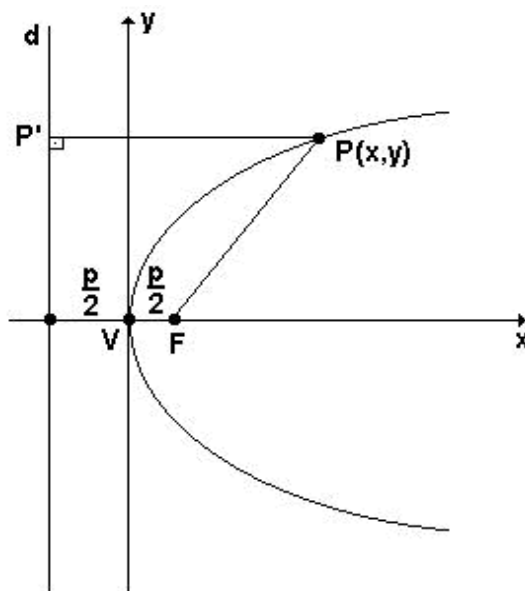


Figura 9 – Parábola

É denominada PARÁBOLA, à curva plana formada pelos pontos $P(x,y)$ do plano cartesiano, tais que

$PF = PP'$ onde:

PF = distância entre os pontos P e F

PP' = distância entre o ponto P e a reta d (diretriz).

Observando a figura acima, consideremos os pontos: $F(p/2, 0)$ - foco da parábola, e $P(x,y)$ - um ponto qualquer da parábola. Considerando-se a definição acima, deveremos ter: $PF = PP'$

Daí, vem, usando a fórmula da distancia entre pontos do plano cartesiano:

$$\sqrt{\left(x - \frac{p}{2}\right)^2 + (y - 0)^2} = \sqrt{\left(x + \frac{p}{2}\right)^2 + (y - y)^2}$$

Desenvolvendo convenientemente e simplificando a expressão acima, chegaremos à equação reduzida da parábola de eixo horizontal e vértice na origem, a saber:

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

Onde p é a medida do parâmetro da parábola.

Pela figura, temos que:

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

$$p = 2 \cdot f$$

Então,

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

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:

$$B = 1,20m$$

Então, deseja-se o valor de x , para $y = \frac{1,20}{2} = 0,60m$. 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.

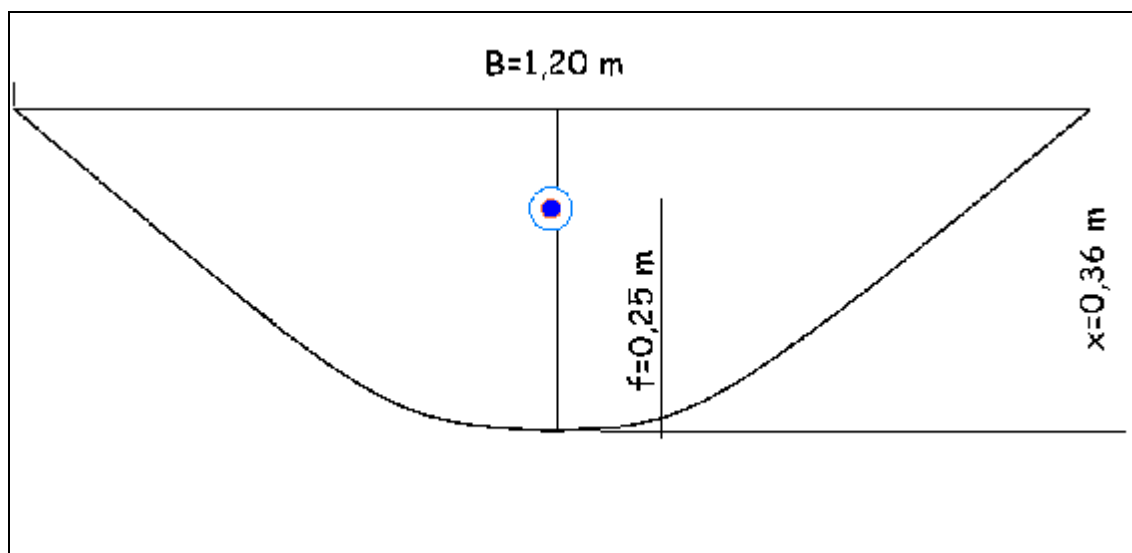


Figura 10 - Dimensões da Parábola

9 PERDAS NA REGIÃO ANULAR

Como mencionado anteriormente, será utilizado um tubo de vidro externo ao tubo receptor, como forma de reduzir as perdas por irradiação. Este mecanismo funciona da seguinte maneira: o vidro é quase transparente ao espectro solar (comprimentos de onda próximos de $3\mu\text{m}$), ou seja, quase toda a radiação que incide sobre ele, o atravessa, sendo o restante absorvido ou refletido; esta radiação que o atravessa, atinge o tubo receptor e o aquece. O tubo aquecido então, emite radiação térmica, que possui um comprimento de onda bem maior que o espectro solar, e por isso, essa radiação não passa pelo vidro, não sendo dissipada ao meio-ambiente.

O ar que está presente na região anular acaba sendo o responsável por um processo de dissipação de calor por convecção natural devido às diferenças de temperatura entre a parede externa do tubo receptor e a parede interna do tubo de vidro.

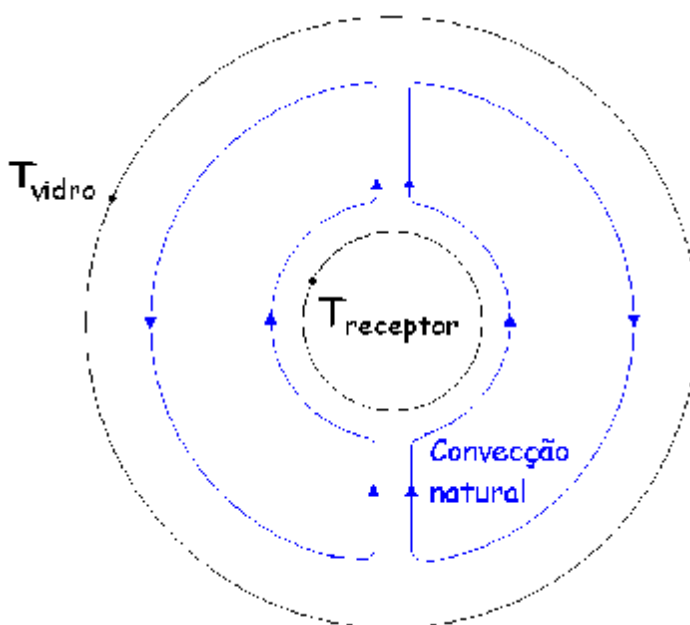


Figura 11 - Convecção Natural na Região Anular

Conforme Incropera (1998) pode-se utilizar a seguinte equação para estimar esta perda:

$$q'_{conv} = \frac{2\pi \cdot k_{ef} \cdot (\bar{T}_{receptor} - \bar{T}_{vidro})}{\ln\left(\frac{D_{vidro}}{D_{receptor}}\right)}$$

Onde:

$$D_{receptor} = 1\text{ pol} = 0,0254\text{ m}$$

$$D_{vidro} = 50\text{ mm} = 0,05\text{ m}$$

$$k_{ef} = k \cdot 0,386 \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{0,861 + \text{Pr}}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot (Ra_c^*)^{\frac{1}{4}}$$

$$Ra_c^* = \frac{[\ln(D_{vidro}/D_{receptor})]^4}{t^3 \cdot \left(D_{vidro}^{\frac{-3}{5}} + D_{receptor}^{\frac{-3}{5}}\right)} \cdot Ra_L$$

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (\bar{T}_{receptor} - \bar{T}_{vidro})}{\nu \cdot \alpha} \cdot t^3$$

$$t = \frac{D_{vidro} - D_{receptor}}{2} = 0,0123 \text{ (distância entre as paredes)}$$

$$\beta = 2,6 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ (coeficiente volumétrico de expansão térmica)}$$

$$g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\nu = 24,76 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \text{ (viscosidade cinemática)}$$

$$k = 32,66 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{mK}} \text{ (condutividade térmica)}$$

$$\alpha = 35,78 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \text{ (difusividade térmica)}$$

$$\text{Pr} = 0,693 \text{ (número de Prandtl)}$$

Para estimar as temperaturas médias das paredes, assumiremos:

- A parede externa do tubo receptor recebe calor diretamente do sol e o transmite à água, portanto assumiremos que esta é 5°C maior

que a temperatura média do fluido (assumindo esta 60°C), a temperatura será considerada 65°C.

- A parede interna do tubo de vidro possui temperatura superior à externa (ambiente), assumiremos esta 5°C superior, ou seja, 30°C.

As propriedades do ar acima fornecidas foram obtidas com uma temperatura média de convecção:

$$\bar{T}_{conv} = \frac{\bar{T}_{vidro} + \bar{T}_{receptor}}{2} = 47,5^{\circ}C = 320,5K$$

Então, teremos:

$$Ra_L = 1911,5$$

$$Ra_c^* = 275,9$$

$$K_{ef} = 41,98 \times 10^{-3} \frac{W}{mK}$$

$$q'_{conv} = 13,63 \frac{W}{m}$$

Como $L=2,08m$, temos:

$$q_{conv} = 28,35W$$

10 SISTEMA DE TRACKING

O concentrador solar aqui apresentado funciona através da incidência direta da radiação do sol, ou seja, ele deve estar precisamente voltado na direção do sol para garantir que os raios estão sendo refletidos no foco da parábola.

Há dois posicionamentos fundamentais para satisfazer tais condições, um deles está relacionado à latitude em que se encontra o aquecedor; tal latitude varia ao longo do ano, porém é razoável admitir-se uma inclinação média. Segue uma figura que representa este posicionamento.

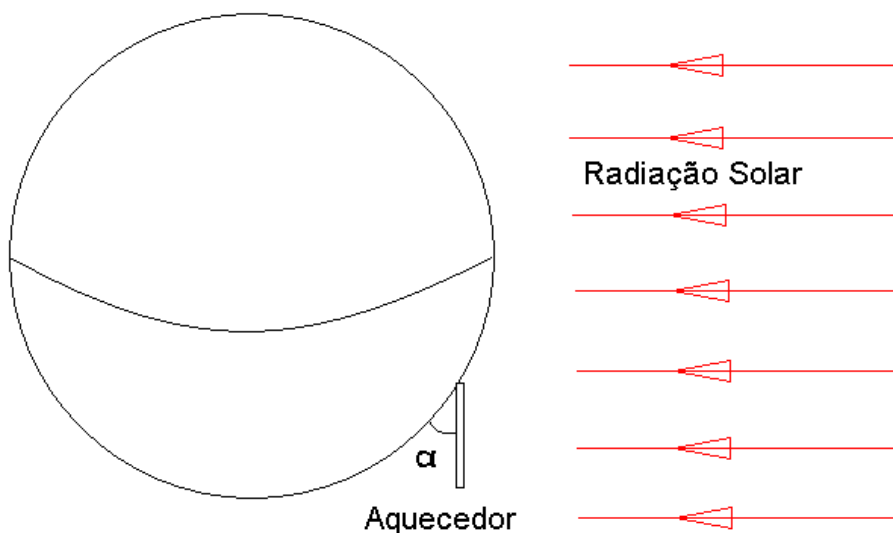


Figura 12 - Posicionamento do concentrador em relação à latitude local

Nota-se que um aquecedor localizado próximo à linha do equador possuiria um ângulo α de 0° .

A inclinação do concentrador deve ser a da latitude local somada a 10° para compensar a variação anual da declinação solar. Para a cidade de São Paulo, a latitude é de 23° , portanto, a inclinação ideal seria de $23+10=33^\circ$.

O segundo posicionamento está relacionado com o movimento de rotação da Terra, afinal o Sol varia sua posição ao longo do dia e é imprescindível que o

aquecedor solar concentrador acompanhe este movimento para manter a radiação sempre perpendicular ao plano que contém as bordas da calha.

Portanto faz-se necessário projetar um sistema de movimentação que poupe o proprietário do aquecedor de ajustar sua posição ao longo do dia.

Como visto anteriormente, um dia possui um período médio de insolação de 12 horas, comumente das 6:00 às 18:00, podendo variar de acordo com a época do ano. Com base no fato de que a intensidade da radiação solar nas primeiras e nas últimas horas do período de sol é baixa, e também basendo-se no período de funcionamento do restaurante, assumiremos que o concentrador solar aqui tratado terá seu período de funcionamento das 9:00 às 15:00 horas, aproveitando assim a coincidência do horário de pico de intensidade de radiação com o horário de pico de utilização da água quente.

Portanto temos um intervalo de 6 horas de funcionamento onde o aquecedor deverá descrever um ângulo de:

$$\begin{array}{ccc} 360^\circ & \leftrightarrow & 24h \\ \beta & \leftrightarrow & 6h \end{array} \Rightarrow \beta = 90^\circ$$

Portanto deve-se projetar um sistema que movimente o equipamento de 0 a 90° a uma velocidade angular de:

$$0,694 \cdot 10^{-3} \text{ rpm}, \text{ ou } \omega = 0,2618 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

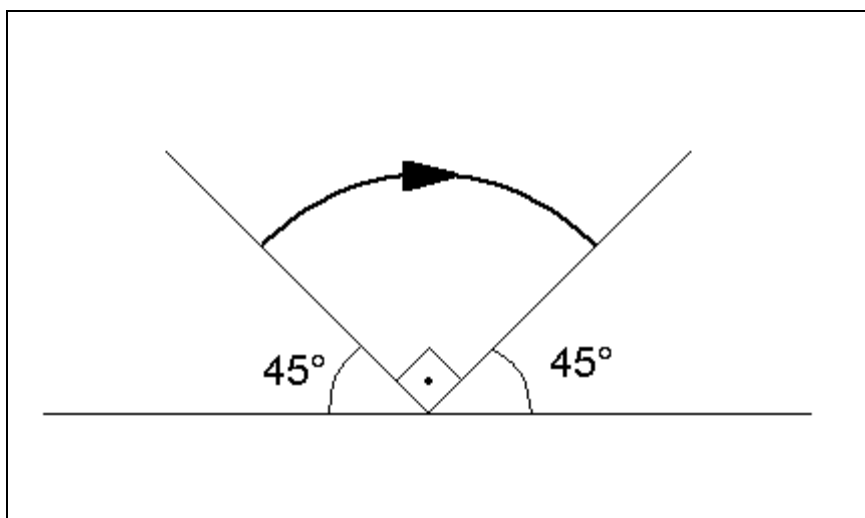


Figura 13 - Movimento a ser realizado pelo equipamento

A velocidade angular necessária é extremamente baixa, fato que dificulta muito a construção de um sistema moto-redutor para movimentar o equipamento.

Uma das idéias para solucionar este problema seria aproveitar o movimento do ponteiro das horas de um relógio, afinal a velocidade angular do mesmo é exatamente o dobro da velocidade angular necessária. Porém seria necessário um relógio de porte muito grande para que se consiga obter o torque necessário para movimentar o equipamento, uma vez que relógios são projetados para fornecer somente o torque suficiente para movimentar os ponteiros.

Foi devido a esses problemas que se obteve duas soluções mais apropriadas:

1. a utilização de um timer analógico como fonte de torque para a movimentação; este aparelho, como mostrado na figura a seguir, fica acoplado a uma tomada e, seu rotor possui a mesma velocidade angular que desejamos, portanto seria possível acoplar a parte móvel da calha a este aparelho e instalar uma chave liga/desliga a ser operada nos horários definidos. Porém, não há garantias de que o aparelho forneça torque suficiente para o trabalho especificado. Testes estão sendo feitos para tentar medir o torque disponível deste aparelho;



Figura 14 - Timer analógico

2. Outra solução possível seria a utilização de dois timers digitais associados a um moto-redutor. Neste caso, o movimento não se daria de forma contínua, mas sim em intervalos de 1 em 1 hora, onde a cada hora o moto-redutor, acionado pelos timers, deslocaria a parábola em 15° . O funcionamento deste aparelho se dá da seguinte maneira: deve-se programá-lo definindo horários para ligar e desligar o equipamento, sendo que o aparelho aceita até 8 programas por dia, com duração mínima de 1 minuto por programa (precisão de 1 minuto). Ao fazer a associação de 2 timers destes em série, pode-se conseguir com que o moto-redutor funcione apenas durante alguns segundos, por exemplo: Configura-se o primeiro timer para ligar às 9:30:00 e desligar às 9:31:00, e configura-se o segundo timer para ligar às 9:30:50 e desligar às 9:31:50, desta maneira, o conjunto só permanecerá ligado das 9:30:50 até as 9:31:00, funcionando durante 10 segundos. Com este tempo de funcionamento, a velocidade angular pode atingir valores maiores, sabendo que a cada hora o sistema deve girar 15° em 10 segundos, sua velocidade angular deve ser de $1,5^\circ/\text{s}$, ou 0,25rpm. Então, com a associação de um

moto-reductor a um par de engrenagens rosca-sem-fim, é possível realizar esta movimentação.



Figura 15 - Timer digital

Vale lembrar que a solução número 1 seria a mais apropriada, tendo em vista que seu custo é menor, e ela propicia um movimento contínuo de rotação ao sistema. A solução de número 2 fica como segunda opção, caso a solução 1 se mostre inviável tecnicamente.

11 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo consiste de um resumo que sintetiza os materiais que deverão ser utilizados na construção do protótipo, selecionados nas etapas anteriores, e também alguns métodos de fabricação que serão utilizados na etapa posterior do trabalho. Segue uma tabela resumo com os principais componentes:

Tabela 3 - Principais materiais selecionados

Componente	Material	Justificativa
Superfície refletora	Aço inox 430 laminado	Cogitou-se espelhos e papel alumínio. Aço Inox tem melhor custo-benefício
Tubulação	Mangueiras de borracha de 8mm	Baixo custo
Estrutura	Madeira	Baixo custo e facilidade de manipulação: furação, fixação, etc.
Reservatório	Geladeira de isopor	Disponibilidade no mercado e facilidade de manipulação
Tubo receptor	Cobre revestido de tinta preta	Maior condutibilidade térmica que a do alumínio
Bomba d'água	---	Bomba de aquário (90L/h)

A tubulação é de mangueiras de 8mm, devido à facilidade de encontrá-los no mercado e preço baixo.

A estrutura de madeira foi confeccionada utilizando-se ferramentas que se tem em casa, sendo que o perfil parabólico para o molde das peças principais será gerado em CAD e impresso em tamanho real.

A geladeira de isopor foi escolhida como reservatório, pois é relativamente fácil furar suas paredes e fixar as peças necessárias, conseguindo também um bom isolamento.

A bomba d'água de aquário foi escolhida devido ao consumo de energia, bem como seu baixo preço no mercado.

12 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.

As ferramentas utilizadas durante o processo são:

- Serra circular
- Serra tico-tico
- Furadeira
- Esquadro
- Régua de aço 60cm
- Trena
- Lixadeira elétrica
- Tesoura de jardinagem (corte das chapas)
- Sargento
- Chave-de-fenda
- Maçarico

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.



Foto 1 - Corte do desenho da parábola

- Corte das tábuas utilizando as serras elétricas;



Foto 2 - Serra circular para cortes retos



Foto 3 - Serra tico-tico para cortes curvos

- 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;



Foto 4 - Estrutura básica montada

- Corte das chapas de aço com a tesoura de jardinagem;
- Fixação das chapas de aço na estrutura com parafusos;

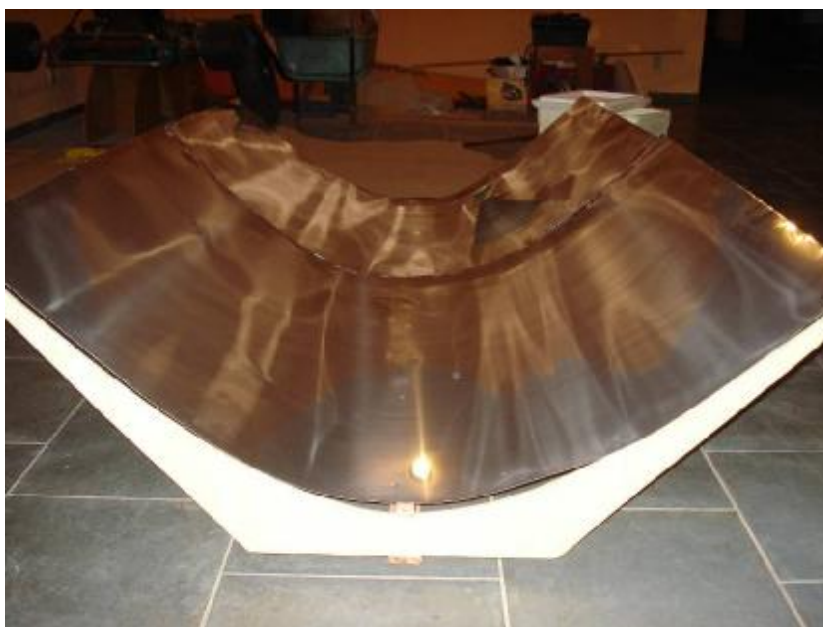


Foto 5 - chapas posicionadas para fixação



Foto 6 - detalhe do parafuso passante na fixação

- Corte e acabamento do suporte do tubo;
- Pintura do tubo de cobre



Foto 7 - Os suportes do tubo já posicionados na calha

- Furação da geladeira de isopor e colocação das mangueiras com pasta de silicone;



Foto 8 - pasta de silicone para vedação



Foto 9 - Posicionamento da bomba no interior do reservatório



Foto 10 - Conexões na extremidade do tubo

12.1 Ensaio

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. Seguem abaixo fotos de um dos dias de ensaio:



Foto 11 – Concentrador sendo ensaiado



Foto 12 – Concentrador sendo ensaiado – vista lateral

13 RESULTADOS

Algumas ressalvas devem ser feitas neste momento; há 2 itens que não foram realizados como o planejado no início do projeto, são eles:

- Isolamento térmico do tubo aquecido com tubo de vidro externo a ele: esta melhoria não pôde ser utilizada nos ensaios devido a uma quebra do tubo de vidro durante o transporte, no dia da compra; o custo do tubo foi de R\$ 87,00 e o aluno decidiu por não gastar esta quantia novamente;
- Sistema de tracking: O sistema de tracking não foi completado com sucesso no projeto. O problema encontrado foi que o timer analógico que seria utilizado não dispõe de torque suficiente para movimentar o aquecedor. A segunda solução apresentada no item 11 deve ser a mais apropriada para a construção deste sistema.

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.

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos nos três ensaios realizados para a temperatura da água no reservatório. Outras temperaturas não foram medidas devido à lentidão no aquecimento, pois o aluno constatou que as temperaturas de entrada e saída no tubo absorvedor são muito similares à temperatura da água no reservatório, ou seja, seu comportamento, se medido ao longo do tempo forneceria gráficos quase iguais aos obtidos para a água do reservatório.

Tabela 4 - Resultados obtidos nos três ensaios

Hora	Temperatura		
	Domingo - Nublado 09/11	Domingo - Ensolarado 16/11	Sábado - Ensolarado 22/11
09:00			23,5
09:15			26,0
09:30			28,0
09:45			30,5
10:00		24,5	33,0
10:15		26,0	36,5
10:30	24,5	28,0	39,0
10:45	24,5	32,0	42,5
11:00	25,5	35,5	45,0
11:15	26,5	38,0	47,5
11:30	27,5	41,0	49,0
11:45	28,5	43,5	50,5
12:00	29,5	46,0	52,0
12:15	30,0	47,5	53,0
12:30	30,0	49,0	54,0
12:45	30,5	50,5	55,0
13:00	30,5	51,0	56,0
13:15	31,0	51,5	56,5
13:30	31,0	52,0	57,0
13:45	32,0	52,5	57,5
14:00	32,0	53,0	57,5
14:15	31,0	53,5	57,5
14:30	31,0	53,5	58,0
14:45	31,0	54,0	58,0
15:00	30,0	54,0	58,0
15:15	30,0	54,0	58,0
15:30	29,0	54,0	57,5
15:45	29,0	53,5	57,0
16:00	28,0	53,5	56,0

Note que os horários de início dos ensaios estão diferentes, pois após o primeiro ensaio viu-se a necessidade de iniciar mais cedo para garantir um bom aproveitamento do horário de pico.

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

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

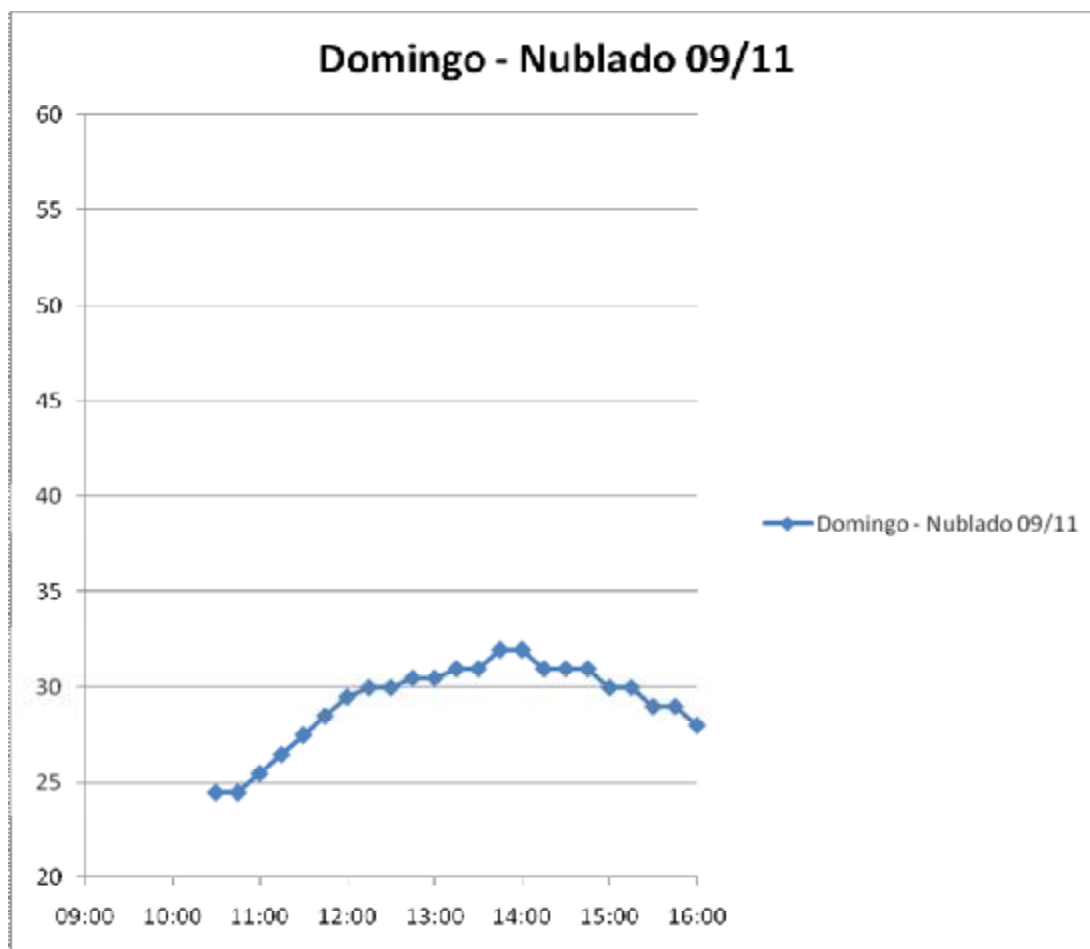


Gráfico para o segundo dia de ensaio.

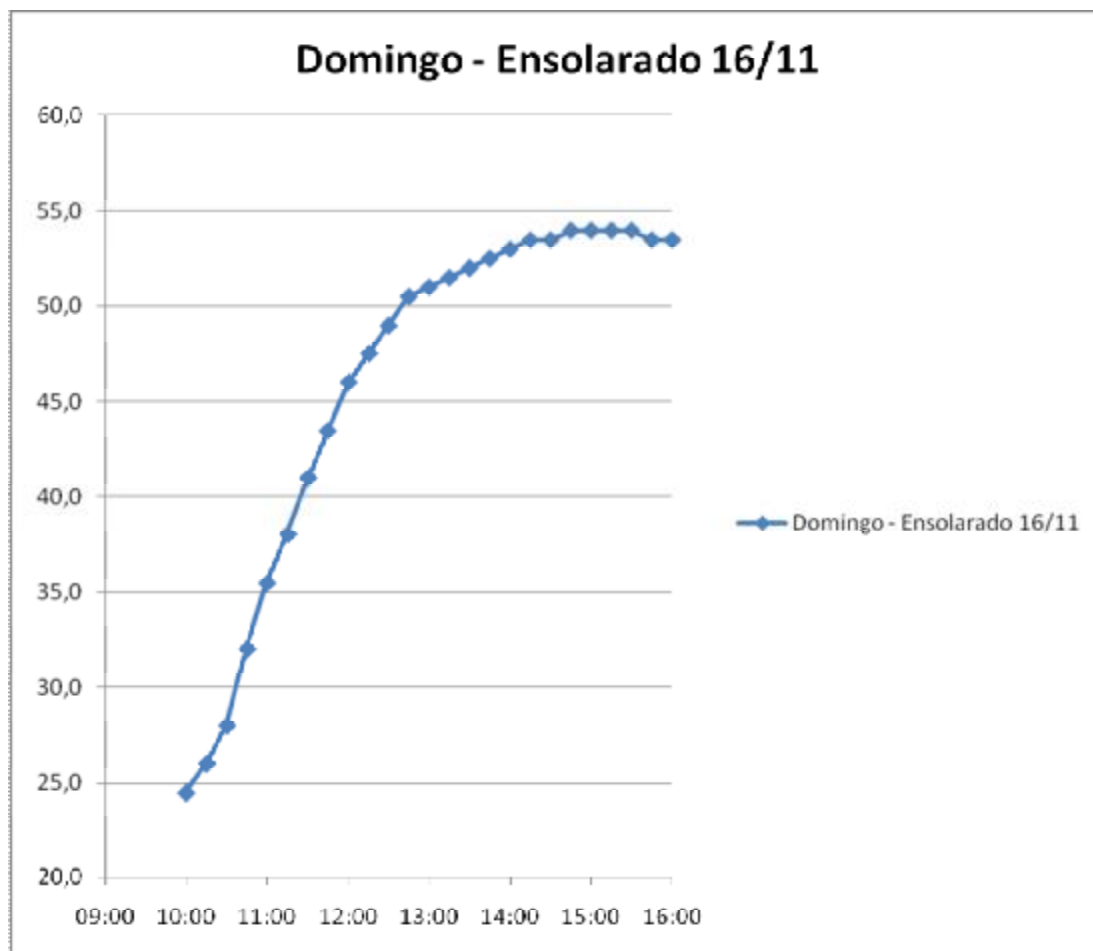
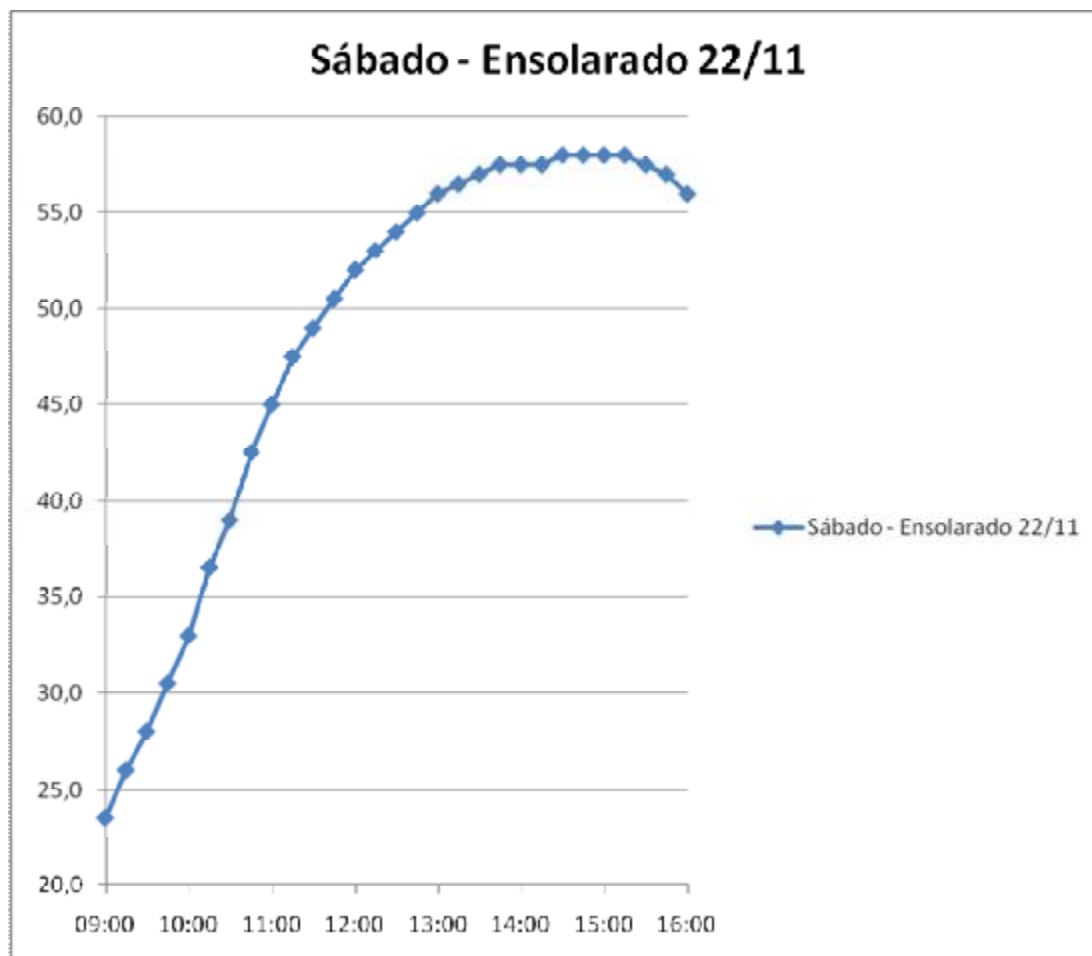


Gráfico para o terceiro dia de ensaio.



14 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.

15 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 seletivo 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 d'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.

16 BIBLIOGRAFIA

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.

Formulação matemática - Parábolas

<http://www.algosobre.com.br/matematica/geometria-analitica-parabola.html>

Catálogo de tubos de cobre - Ramo

<http://www.ramo.ind.br/canos.htm>

Informações sobre intensidade da radiação solar

<http://mitos-climaticos.blogspot.com/2005/06/radio-solar-incidente.html>

Informações técnicas – lava-louças

<http://www.gemaso.com/lava-louca.htm>

ANEXO I – Cronograma

		Janeiro	FEVEREIRO					MARÇO					ABRIL					MAIO					JUNHO					Julho	AGOSTO					SETEMBRO					OUTUBRO					NOVEMBRO					Dez
Atividade			S23	S24	S25	S26	S27	S28	S29	S30	S31	S32	S33	S34	S35	S36	S37	S38	S39	S40	S41	S42	S43	S44		S45	S46	S47	S48	S49	S50	S51	S52	S53	S54	S55	S56	S57	S58	S59	S60	S61							
1	Pesquisa Bibliográfica																																																
2	Pesquisa e decisão sobre aplicação específica do produto																																																
3	Estudo de casos																																																
4	Definição dos parâmetros de projeto.																																																
5	Projeto do equipamento.																																																
6	Determinação dos métodos e materiais de construção.																																																
7	Construção do protótipo																																																
8	Análise do desempenho do protótipo																																																
9	Entrega do Relatório Final e do Poster																																																
10	Apresentação final do trabalho de conclusão de curso																																																

Planejado

Realizado