



**INSTITUTO FEDERAL**

Minas Gerais

Campus Avançado Arcos

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS - *CAMPUS* ARCOS  
ENGENHARIA MECÂNICA

André Luís dos Santos  
Guilherme Bezerra de Faria  
Joice Paloma Faria  
Túlio de Paulo Corrêa  
Wesley José de Oliveira

## **Ciclo de Refrigeração por Absorção: Construção do Concentrador Solar**

Arcos-MG

Julho de 2019

André Luís dos Santos  
Guilherme Bezerra de Faria  
Joice Paloma Faria  
Túlio de Paulo Corrêa  
Wesley José de Oliveira

## **Ciclo de Refrigeração por Absorção: Construção do Concentrador Solar**

Trabalho Acadêmico Integrador apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Campus Arcos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG).

Instituto Federal de Minas Gerais  
*Campus Arcos*  
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio

Arcos-MG  
Julho de 2019

# RESUMO

Este projeto tem como objetivo o estudo do ciclo de refrigeração por absorção, que utiliza um concentrador solar de potência útil de 83,82 W e eficiência total de 22,56% para captação de energia térmica, e assim, tornar o protótipo sustentável no quesito de não depender de energia elétrica para funcionamento do mesmo. O protótipo é capaz de aquecer 0,547 litros de água até 81°C. Este processo segue o princípio da refrigeração por absorção, onde o compressor é substituído por um sistema que utiliza os raios solares para o aquecimento do fluido de trabalho. Devido aos aspectos econômico e ambientais, a utilização de sistemas autossustentáveis vem se tornando atrativo para a sociedade e se torna bem útil em áreas isoladas, onde não há fornecimento de energia elétrica na conservação de alimentos, bebidas e suprimento médico.

**Palavras-chave:** Refrigeração por Absorção; Concentrador Solar; Sustentável

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>4</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	<b>4</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo geral</b>	<b>5</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>6</b>
<b>2.1</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>6</b>
2.1.1	Componentes do ciclo de refrigeração por absorção	6
2.1.2	Ciclo de refrigeração por absorção com pressão total única	8
<b>2.2</b>	<b>Coletor Solar Cilindro Parabólico</b>	<b>9</b>
2.2.1	Calculo para Determinação das Dimensões do concentrador Cilindro Parabólico	10
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>11</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais utilizados</b>	<b>11</b>
<b>3.2</b>	<b>Métodos</b>	<b>11</b>
3.2.1	Cálculos do foco da parábola	12
3.2.2	Experimento do foco calculado	13
3.2.3	Radiação Solar	14
3.2.4	Carta solar	15
3.2.5	Deflexão do tubo absorvedor	16
3.2.6	Determinação da menor dimensão admissível nos pés da estrutura	18
3.2.7	Cálculos da eficiência de aquecimento do coletor	20
<b>3.3</b>	<b>Montagem do protótipo</b>	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>24</b>
<b>4.1</b>	<b>Deflexão tubo de cobre</b>	<b>24</b>
<b>4.2</b>	<b>Determinação do menor tamanho do pé da estrutura</b>	<b>24</b>
<b>4.3</b>	<b>Cálculos da eficiência de aquecimento do coletor</b>	<b>24</b>
<b>4.4</b>	<b>Teste do aquecedor solar</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>26</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>27</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Com surgimento da refrigeração por compressão mecânica em 1880, o ciclo de refrigeração por absorção foi se tornando obsoleto com o passar do tempo, uma vez que o ciclo por compressão apresenta rendimentos energéticos maiores que a refrigeração por absorção. Sendo assim, Platten e Munsters (1926, 1928) propuseram um sistema por absorção mais simples, utilizando um ciclo de pressão única, onde não há bomba mecânica e válvula de expansão. A retirada desses componentes ocorreu com a introdução de um gás inerte ( $H_2$ ) no ambiente de baixa pressão, de maneira que todos os ambientes passaram a trabalhar com a mesma pressão total. O hidrogênio se apresenta somente na fase gasosa da amônia e fica retido no evaporador e no absorvedor por meio de sifões líquidos, o que promove a redução da pressão parcial do  $NH_3$  nestes dois componentes (CHAVES, 2009).

Esse último projeto perdeu espaço com as crises energéticas da época. Atualmente, porém, com uma maior conscientização ecológica, e um maior aproveitamento de energias renováveis, as atenções se voltam novamente para a refrigeração por absorção, dada a vasta possibilidade de aproveitamento de calor oriundo de processos industriais ou de fontes renováveis como a energia solar, biomassa, automóveis, entre outros.

As informações na literatura científica sobre a refrigeração por absorção operando com pressão única ainda é carente. O entendimento do ciclo por absorção a pressão única envolve diferentes áreas, principalmente a termodinâmica, a transferência de calor e a química inorgânica. Apesar do novo interesse, a refrigeração por absorção a pressão única carece de estudos para sua melhor compreensão.

Este projeto apresenta um breve estudo bibliográfico do ciclo de absorção com pressão total única e os estudos e métodos da construção de um protótipo da placa refletora de raios solares, com o intuito de fornecer calor para o funcionamento contínuo do sistema e torna-lo sustentável.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Desde o início da humanidade o homem vem aprimorando ferramentas e métodos para uso de recursos para um melhor conforto e qualidade de vida. O uso da refrigeração representou um dos mais importantes avanços da civilização moderna. A possibilidade de guardar e conservar alimentos deu as civilizações humanas perspectivas muito maiores que aquelas almeçadas antigamente.

A maioria dos equipamentos de refrigeração utilizados atualmente utilizam o sistema com ciclo de compressão a vapor. O projeto a ser desenvolvido visa a utilização do ciclo de refrigeração por absorção com pressão total única (RAPTU). O uso deste é justificado quando uma fonte térmica de baixo custo é disponível, como placa solar, gases de chaminés de indústrias ou gases de veículos à combustão (CHAVES, 2009).

A utilização do sistema de refrigeração por absorção não necessita exclusivamente de energia elétrica como o sistema de refrigeração por compressão a vapor, o que possibilita reduzir os custos com energia elétrica, além de justificar o seu uso em áreas isoladas ou que não possuem o fornecimento de energia elétrica.

A construção do ciclo de refrigeração por absorção será fundamental para o aprendizado prático das disciplinas da área térmica, por parte dos alunos do curso de Engenharia Mecânica no IFMG – *Campus* avançado Arcos.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O trabalho geral tem como objetivo projetar e construir um protótipo de refrigeração por absorção sustentável ao longo de 4 semestres. Sendo esta parte do trabalho, o projeto e construção da placa refletora de raios solares para aquecimento do fluido de trabalho do ciclo de refrigeração por absorção com pressão total única.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisão bibliográfica do ciclo de refrigeração por absorção;
- Otimização das formas de construção da placa para melhor aquecimento do fluido;
- Construção do concentrador solar.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Refrigeração é o processo que remove calor de um meio, reduzindo sua temperatura e mantendo as condições por meios de sistemas mecânicos. A utilização da refrigeração são muitas, tais como, a conservação dos alimentos e a climatização ou condicionamento de ar. A refrigeração por absorção foi descoberta pelo escocês Nairn em 1777. Em 1860 nos Estados Unidos foi patenteado o primeiro sistema de absorção pelo francês Ferdinand Carré, e o seu primeiro uso foi pelos estados confederados durante a guerra civil na necessidade de gelo natural (STOECKER; JONES, 1985).

Segundo Boles e Çengel (2013) a refrigeração por absorção teve bastante utilidade no passado onde se tornou obsoleta devido a refrigeração por compressão a vapor. Porém hoje se torna altamente útil quando se tem uma fonte de energia térmica de baixo custo e acessível de 100°C a 200°C, como por exemplo placas solares gases de escape como de termoelétricas ou de veículos a combustão. Para Sbravati e Silva (2019) os sistemas de refrigeração por absorção são classificados como sistemas intermitentes e sistemas contínuos, podendo o último ser utilizado com ou sem o auxílio de uma bomba.

Dentre os vários tipos de refrigeração por absorção existente, este trabalho aborda o sistema de refrigeração por absorção contínuo sem auxílio de bomba. O ciclo de refrigeração por absorção com pressão total única (RAPTU) utiliza como fonte térmica um concentrador solar de baixo custo para aquecer o líquido refrigerante e absorvente, que juntamente com o gás hidrogênio será possível manter em funcionamento o sistema.

#### 2.1.1 COMPONENTES DO CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

##### GERADOR

O gerador contém a mistura dos fluidos refrigerante e absorvente, amônia e água respectivamente. Após receber calor a solução aquecida separa o fluido refrigerante do absorvente e sobe para o retificador, no qual a água contida no vapor de amônia se condensa, e por gravidade retorna para o absorvedor.

##### RETIFICADOR

No processo de retificação, a solução recebida pelo gerador deve ser fracionada para que o condensador receba apenas o fluido refrigerante, a água retirada da solução é direcionada para o absorvedor, por meio da gravidade.

## CONDENSADOR

Este processo tem a função de condensar a amônia pura que sai do retificador e direcioná-la para a válvula de expansão. Neste processo há a transferência de calor para o meio. (CHAVES, 2009).

## VÁLVULA DE EXPANSÃO

A válvula de expansão é o dispositivo que controla a passagem do fluido refrigerante, e é destinado a reduzir a pressão do fluxo da amônia do nível do condensador para o nível do evaporador (OLIVEIRA et al., 2004).

## EVAPORADOR

Para que ocorra a evaporação da amônia o evaporador recebe o calor do ambiente. Dois tubos concêntricos compõem o evaporador. A amônia líquida chega por um tubo lateral e logo em seguida cai no tubo concêntrico externo. Esses componentes são ligados ao condensador e ao vaso absorvedor (CHAVES, 2009).

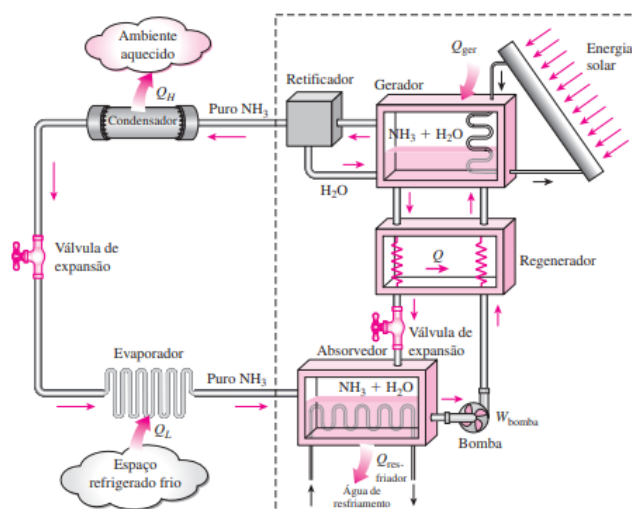
## ABSORVEDOR

O absorvedor se localiza entre o gerador e o evaporador, e tem a função de receber a solução pobre proveniente do gerador, e o vapor de amônia do evaporador, tornando a solução rica e direcioná-las para o gerador, por meio da bomba, para que se reinicie o ciclo.

## BOMBA

Localizada entre o absorvedor e o gerador, sua função consiste em bombear o fluido enriquecido para o gerador, neste processo ocorre a alteração de pressão do sistema.

Figura 1 – Ciclo de refrigeração por absorção

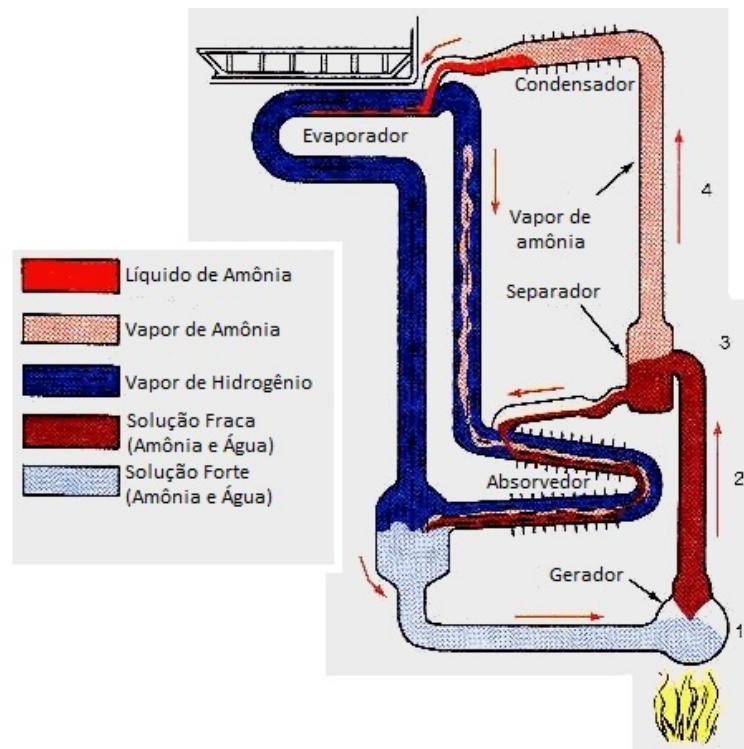


Fonte: (CENGEL; CIMBALA, 2015)



## 2.1.2 CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO COM PRESSÃO TOTAL ÚNICA

Figura 2 – Sistema de refrigeração por absorção



Fonte: (SBRAVATI; SILVA, 2019)

O ciclo RAPTU foi desenvolvido em 1926 e aperfeiçoado em 1928, por Von Planten e C. G. Munters. Esse ciclo necessita de um fluido refrigerante, um absorvente e de um gás inerte, que desempenha a função de auxiliar a vaporização da amônia no evaporador através de processos químicos, são eles amônia, água e hidrogênio ( $H_2$ ), respectivamente.

O sistema de absorção comum é composto de componentes de alta e baixa pressão. Os componentes de baixa pressão incluem o evaporador e o absorvedor e os de alta pressão o gerador e condensador. A Figura 1 mostra um sistema de absorção básico. Neste caso para elevar a pressão da solução rica, que vai para o gerador, é utilizada uma bomba mecânica e que o retorno da solução pobre e da amônia, para os componentes de baixa pressão, é possível através de dispositivo de expansão e válvula redutora de pressão.

O RAPTU, porém, utiliza a pressão parcial de um gás inerte (hidrogênio) nos processos de baixa pressão. Dessa forma a pressão parcial da amônia se apresenta baixa. A pressão total dos componentes de baixa pressão é igual ao dispositivo de alta pressão e o ao ciclo que opera, então, com uma pressão total única não necessitando de bomba mecânica, válvula redutora de pressão ou dispositivos de expansão. Descrevem-se, a seguir, os processos térmicos e hidrodinâmicos que ocorrem no sistema (RAPTU), representado na Figura 2, no momento em que o mesmo é posto em funcionamento.

O concentrador solar através da reflexão fornece calor para o gerador (1). O Vapor de amônia é separado da solução passando pelo do tubo coador (2). A solução é levada até o

separador (3). Grande parte da solução líquida contida no separador após o passo 3 desce para o absorvedor. O vapor de amônia sobe através de um tubo até o condensador, por estar a uma densidade menor (4), a amônia condensada cai no evaporador. O hidrogênio presente em grande quantidade no evaporador é o responsável pela evaporação da amônia. O processo ocorre a uma baixa temperatura e pressão. A amônia retira calor do compartimento de refrigeração quando no processo de evaporação, e o vapor de amônia mistura com o hidrogênio. A solução fraca de amônia passa pelo separador (3), até o topo do absorvedor. No topo do absorvedor a solução de amônia do evaporador se mistura com gás hidrogênio. O hidrogênio volta até o evaporador. O resfriamento da solução fraca faz a reabsorção do vapor de amônia e hidrogênio. A água absorve vapor de amônia, e calor é liberado. As aberturas de ventilação removem calor e a refrigeração é continuada. Por fim a mistura de água com amônia líquida volta para o gerador e o ciclo recomeça (SBRAVATI; SILVA, 2019).

A quantidade de informação disponível sobre o assunto ainda é escassa, portanto, faz-se necessário uma pesquisa mais detalhada e objetiva deste conteúdo. No entanto, o foco deste trabalho é estudar o concentrador solar para o fornecimento de calor para o gerador. No segundo estágio deste projeto em que será realizado a construção do refrigerador propriamente dito, pretende-se apresentar informações mais concretas sobre sistema RAPTU.

## 2.2 COLETOR SOLAR CILINDRO PARABÓLICO

Como descreve Souza (2008), existe três tipos de sistemas termossolares de concentração (STC), concebidos com a finalidade de converter a radiação solar em outras fontes de energia mediante concentradores solares: coletores cilindros parabólicos (CCP), sistema de receptor central (CRS) e sistema de torre e disco parabólico (DP). O primeiro concentra a radiação em um eixo linear focal e os dois últimos em um ponto focal.

Afim de aproveitar a radiação solar e transformar em energia térmica, utilizou-se de um coletor solar cilindro parabólico composto por receptor e concentrador. O receptor a área onde a radiação é absorvida e convertida em energia térmica e o concentrador a área ótica onde concentra toda a radiação incidente. Para que os raios do sol que incidem sobre a superfície do concentrador e sejam redirecionados para o absorvedor, o coletor deve estar posicionado perpendicularmente aos raios solares. Portanto, coletores com concentradores parabólicos podem conter sistemas de rastreamento solar para que haja um melhor aproveitamento da incidência solar, obtenha temperaturas mais constantes. O sistema deve possuir um rastreamento solar, que segue o sol de leste a oeste, quando orientados na direção Norte-Sul ou um ajuste manual no ângulo de inclinação do coletor, quando orientado em Leste-Oeste (CARVALHO, 2018).

O concentrador cilindro parabólico se destaca dentre os outros por apresentar construção relativamente mais simples, possuir foco axial e espelho contínuo. Este concentrador possui uma superfície refletora em forma de um cilindro de secção parabólica, e no seu foco se encontra o tubo absorvedor. Sua superfície externa possui revestimento que aumenta a capacidade de absorver a radiação nele incidente. Este tubo absorvedor ainda pode ser envolto por uma cobertura transparente, com o intuito de diminuir as perdas térmicas (KROTH, 2016).

### 2.2.1 CALCULO PARA DETERMINAÇÃO DAS DIMENSÕES DO CONCENTRADOR CILINDRO PARABÓLICO

Como o concentrador possui propriedades óticas semelhantes às de espelhos esféricos côncavos, pode-se calcular suas dimensões a partir das seguintes equações (KROTH, 2016 apud HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

$$R = \frac{A \cdot 180}{\alpha \cdot \pi} \quad (1)$$

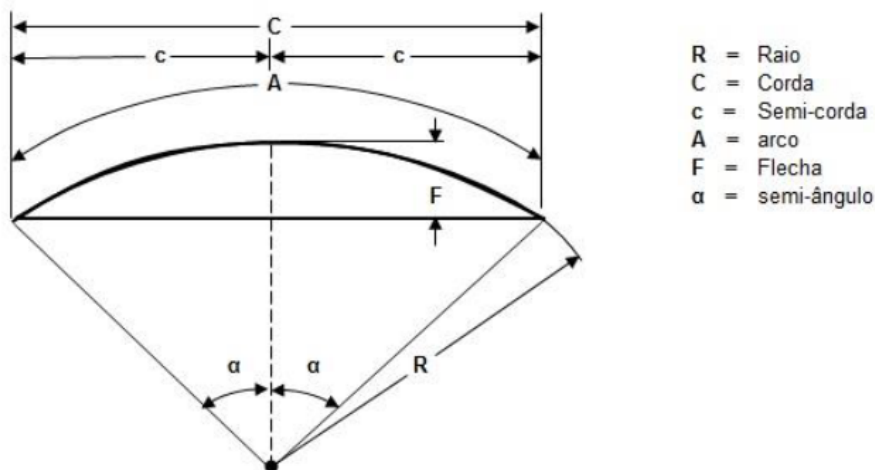
$$C = 2R \cdot \text{sen} \left( \frac{\alpha}{2} \right) \quad (2)$$

$$F = R - \left( R \cdot \cos \left( \frac{\alpha}{2} \right) \right) \quad (3)$$

De acordo com Kroth (2016), o ângulo de borda do concentrador, ( $\alpha$ ) na figura 3, deve ser próximo dos 70 graus, onde o mesmo alcança a máxima concentração para qualquer desvio.

Figura 3 – Dimensões do arco de círculo

**Raio, corda, flecha e ângulo de um arco de círculo**



Fonte: (KROTH, 2016)

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados para a construção do concentrador solar estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Materiais

	Descrição	Qtd	Custo (R\$)
1	Molde de Madeira MDF	4 un	60,00
2	Base Aço Carbono	1 un	30,00
3	Manta de fibra de vidro	3,75 m <sup>2</sup>	57,50
4	Folha de zinco	1m <sup>2</sup>	39,40
5	Resina	2 un	48,00
6	Lixa d'água 200	2 un	4,30
7	Parafusos/Porcas/Arruelas	4 un	1,50
8	Filme solar reflexivo	1 m <sup>2</sup>	84,00
9	Tinta Cromo	400 ml	17,51
10	Tubo de cobre	1,20 m	38,76
11	Barra rosqueada/Porcas/Arruelas	18 un	5,70
12	Tinta spray preto	1 un	14,20
Total			400,87

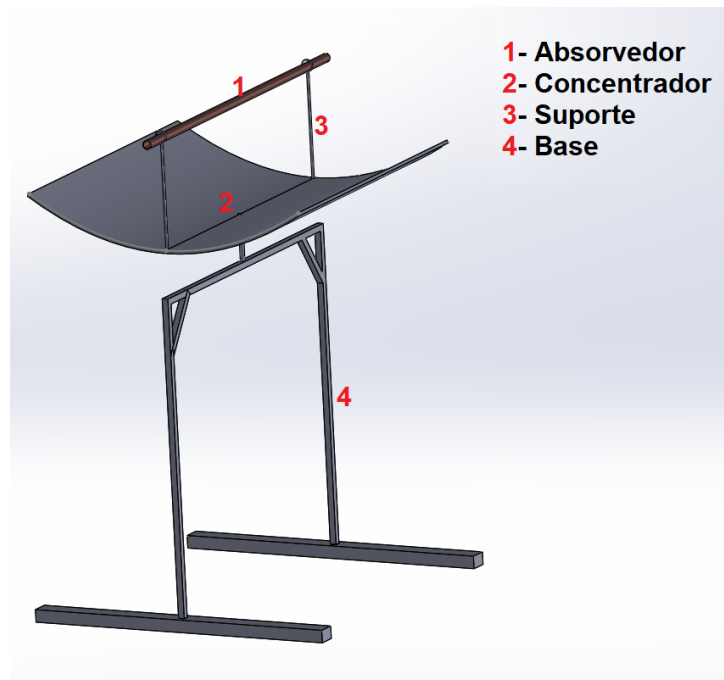
Fonte: Próprios autores

### 3.2 MÉTODOS

A principal referencia utilizada para o tabalho, encontra-se em (CHAVES, 2009).

Para a construção do concentrador solar utilizou-se o *software* de modelagem 3D, *Solid Works*, para melhor entendimento do concentrador solar parabólico, figura 4.

Figura 4 – Modelagem 3D do concentrador solar



Fonte: Próprio autores.

### 3.2.1 CÁLCULOS DO FOCO DA PARÁBOLA

Para encontrar o ponto de concentração dos raios solares para aquecimento do fluido, é necessário determinar o foco da parábola da seção transversal do cilindro parabólico. O foco pode ser deduzido através da equação reduzida da parábola, equação 4, (STEINBRUCH; WINTERLE, 1987). Substituindo os parâmetros definidos anteriormente na seção 2.2.1, obtém-se:

$$y^2 = 2px \quad (4)$$

Onde  $p$  é a distância entre o foco ( $f$ ) e a diretriz, ou seja,  $f = 2p$ , figura 5,  $x$  pode ser entendido como a flecha ( $F$ ) e  $2y$  a corda ( $C$ ), assim como na figura 3. Sendo assim, o foco pode ser definido como:

$$f = \frac{C^2}{16F}$$

Utilizando as equações (1, 2 e 3) para encontrar a o raio, a flecha e a corda, para  $\alpha = 70$  e  $A = 1m$  devido a restrição de construção do protótipo. obtém-se:

$$R = 0,82$$

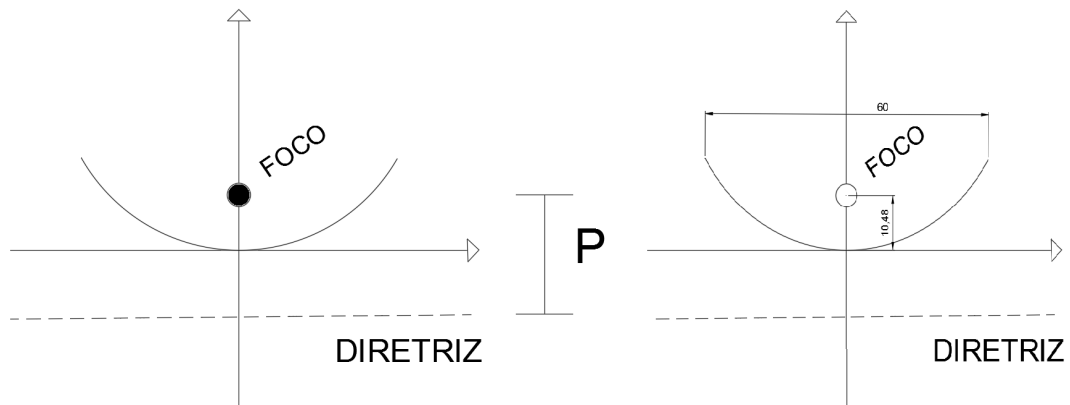
$$C = 0,93$$

$$F = 0,15$$

Logo o foco da parábola é:

$$f = 0,36$$

Figura 5 – Foco de uma parábola



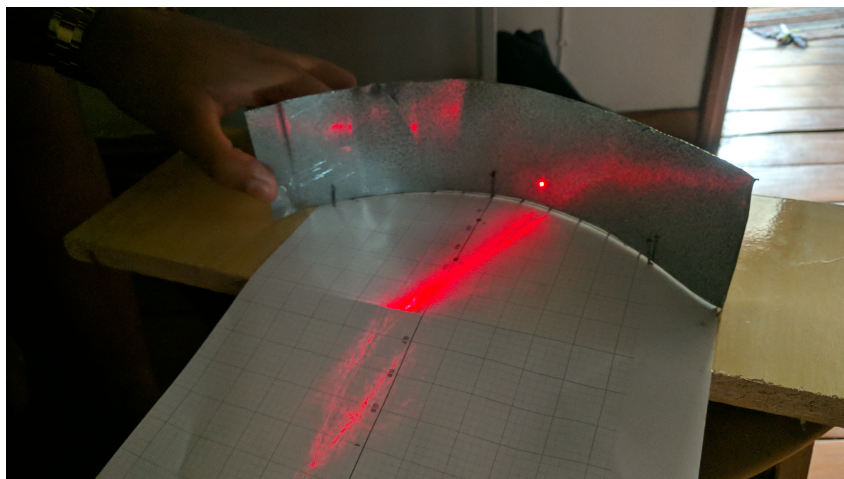
Fonte: Próprio autores

O arco ( $A$ ) utilizado para encontrar o raio ( $R$ ) deve possuir 1 m, devido a limitações do material escolhido para reflexão.

### 3.2.2 EXPERIMENTO DO FOCO CALCULADO

Para verificação do foco encontrado, foi realizado um experimento no *Software GeoGebra* e impresso em uma folha A4 com formato da área da seção transversal do concentrador solar. Em seguida, com o auxílio de um feixe de raio laser, foi direcionado sob uma superfície refletora de forma perpendicular, afim de verificar o ponto focal do coletor. Se a luz do laser for de encontro ao ponto sob o papel, isso implica que o foco está correto ao estabelecido.

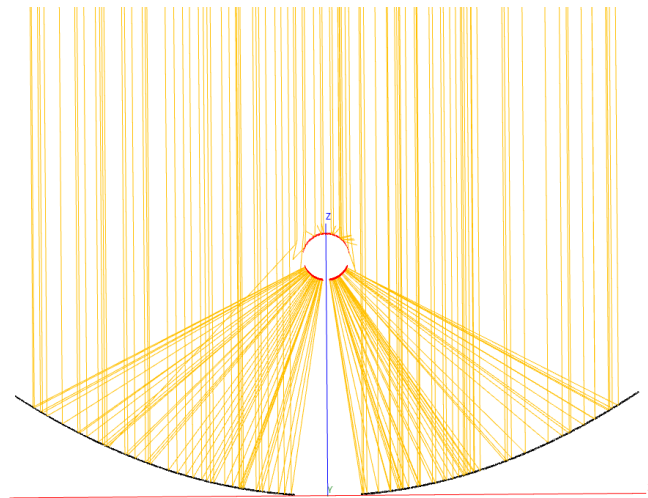
Figura 6 – Teste do ponto focal com laser



Fonte: Próprio autores

Em seguida foi feita uma simulação de incidência solar sobre o concentrador no *software Soltrace*, onde foi confirmado computacionalmente a exatidão do foco e a posição correta do tubo absorvedor. (Figura 7).

Figura 7 – Teste do foco no software Soltrace



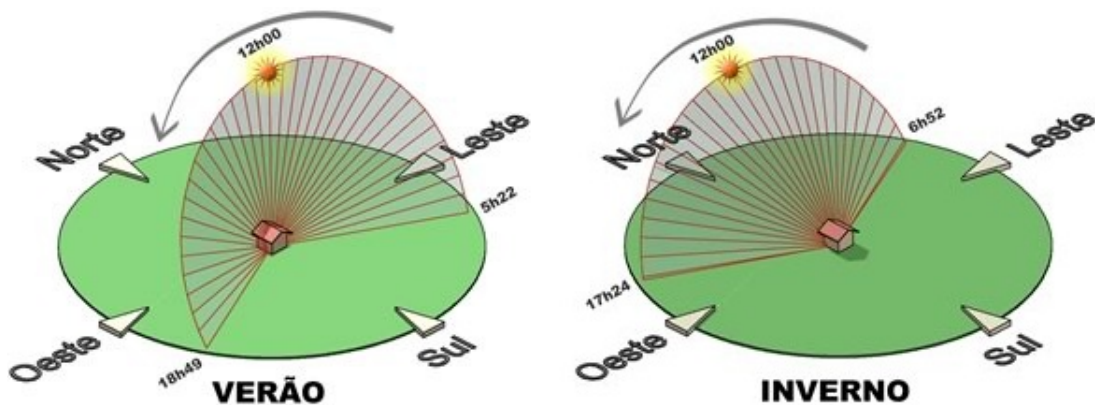
Fonte: Próprio autores

### 3.2.3 RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar é o fluxo de energia emitida pelo sol e transmitida sob a forma de radiação eletromagnética, podendo ser denominadas como Irradiância Solar Total (*TSI - Total Solar Irradiance*) ou Irradiância Solar Espectral (*SSI - Solar Spectral Irradiance*) (GÓMEZ et al., 2018).

A radiação solar que atinge a atmosfera é dividida duas partes, sendo a primeira a radiação direta, que é a radiação solar que não foi espalhada pela atmosfera e a segunda, a radiação difusa, que é a radiação solar que teve sua direção alterada pela atmosfera. A soma da radiação solar direta e radiação solar difusa, em uma superfície horizontal é conhecida como radiação solar global (CARVALHO, 2018). O vetor da radiação direta e o vetor normal a uma superfície formam o ângulo de incidência solar, que varia com a declinação do sol e a hora do dia.

Figura 8 – Raios de incidência solar no verão e inverno



Fonte: (BRASIL, 2014)

### 3.2.4 CARTA SOLAR

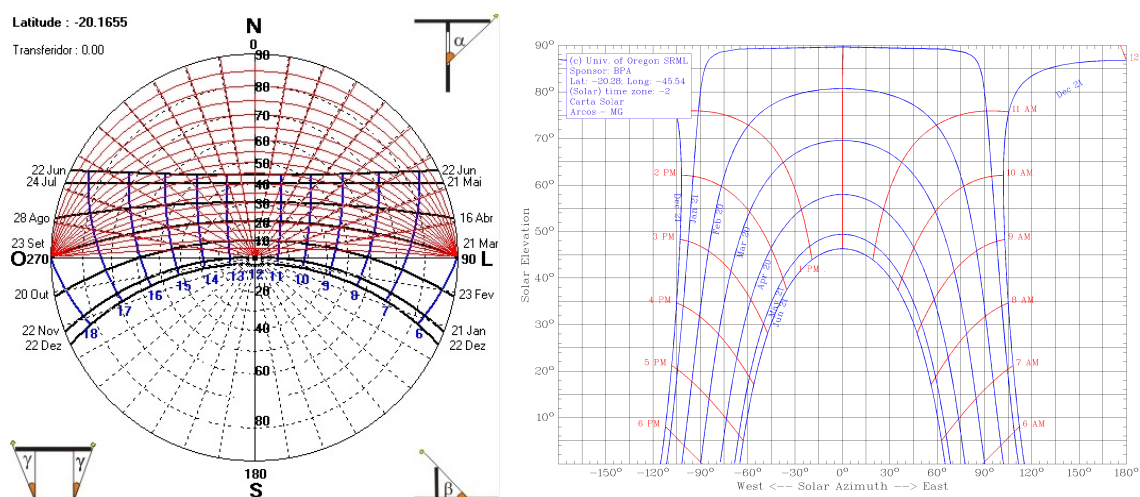
A carta solar é uma representação gráfica que mostra a posição do sol de acordo com o dia e mês do ano, onde cada curva representa o caminho percorrido pelo sol. Utiliza como parâmetros, a altura: ângulo formado pela direção do Sol e o plano horizontal do lugar, e o azimute: ângulo formado pelo plano vertical passando pelo sol e a direção do Norte geográfico do lugar (CUNHA, 2005).

Para a obtenção da carta solar foi utilizado as coordenadas geográficas da cidade de Arcos, MG, local da instalação do *Campus Arcos* do IFMG: Latitude:  $-20^{\circ}.28194$ , Longitude:  $-45^{\circ}53944$ .

A primeira carta solar, figura 9.a, foi gerada no *software* gratuito *Analysis Sol-Ar* do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina e ajuda na visualização dos equinócios, duração do dia e noite iguais, visível na curva do centro da carta. A segunda carta solar figura 9.b foi gerada no site do laboratório de monitoramento de radiação solar da Universidade de Oregon, a qual ajuda na visualização dos solstícios de inverno e verão, representados pelas curvas menores e maiores respectivamente. Os dados das mesmas ajudarão nas decisões futuras do grupo no que diz respeito a eficiência de aquecimento do coletor solar.

O eixo externo, figura 9.a, ou horizontal, figura 9.b, representa o azimute e o eixo interno, 9.a, ou vertical, 9.b, representa a altitude. A curva de menor inclinação é do solstício de inverno que corresponde ao menor dia do ano e a curva de maior inclinação é do solstício de verão, correspondente ao maior dia do ano (STERN, 2017).

Figura 9 – Carta solar da cidade de Arcos, MG



Fonte: Próprios autores em *Analysis Sol-Ar* e Universidade de Oregon

Após análises da carta solar é possível observar que a elevação solar média, ângulo formado pela direção do Sol e a superfície horizontal na cidade de Arcos para todo o ano, é de aproximadamente  $70^{\circ}$ . Para um melhor aproveitamento da incidência solar a superfície prestes a recebe-la deve estar perpendicular a mesma, portanto faz necessário conceder uma leve inclinação no corpo de  $20^{\circ}$ , afim de melhorar o aproveitamento.



### 3.2.5 DEFLEXÃO DO TUBO ABSORVEDOR

Foi realizado o estudo da deflexão no tubo absorvedor, o qual está posicionado à uma distância da base da parábola, sendo essa distância o valor encontrado para o foco. O estudo tem como objetivo encontrar a deflexão máxima que ocorre no tubo absorvedor e caso o valor da deflexão seja alta, o foco será prejudicado e, portanto o tubo deverá ser trocado.

Foi definido a utilização do tubo de 28 *mm* de diâmetro, por limitações do próprio material, e devido aos custos e dificuldade de encontrar o mesmo. O comprimento do tubo foi definido de 1,2 *m* pelo fato do concentrador possuir 1 *m* de comprimento, afim de facilitar o acoplamento dos componentes futuros do sistema. Realizou-se pesquisas sobre o material e encontrou a densidade do material, (8960 *kg/m*<sup>3</sup>) e seu módulo de elasticidade (*E*) de 124 GPa (NESTOR, 2017). Para encontrar a massa do tubo absorvedor é necessário conhecer a área do tubo, sendo:

$$A = \pi \cdot (r_e^2 - r_i^2) \quad (5)$$

Onde:

$r_e$  - raio externo;

$r_i$  - raio interno.

Logo, com volume conhecido, produto da área do tubo pelo seu comprimento de 1,2 metros, foi encontrando a massa do tubo absorvedor.

$$m = \rho \cdot V \quad (6)$$

Onde:

$\rho$  - densidade do cobre;

$V$  - volume do tubo.

Após realizar os cálculos foi encontrado a massa de 0,729 kg e o peso distribuído de 5,96 N/m.

Para realizar a deflexão máxima, foi considerado o volume máximo que o tubo suporta, por ser um fator que interfere na deflexão do tubo. Dentro do tubo se encontra água em escoando, cujo o  $\rho$  adotado é de 1000 *kg/m*<sup>3</sup>, foi calculo a massa presente dentro do tubo. Com o volume interno do tudo encontrado, foi aplicando a equação 6 para o fluido, encontrado a massa de 0,658 kg e seu peso distribuído de 5,38 N/m.

Para encontrar a deflexão máxima, utilizou a somatória das cargas distribuídas ao longo do tubo, sendo  $W_T$ :

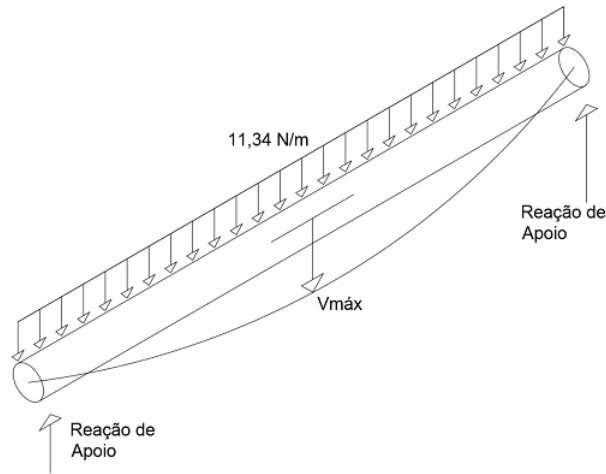
$$W_T = W_{Tubo} + W_{H_2O} \quad (7)$$

Onde:

$W_{Tubo}$  - peso distribuído do tubo, N/m;

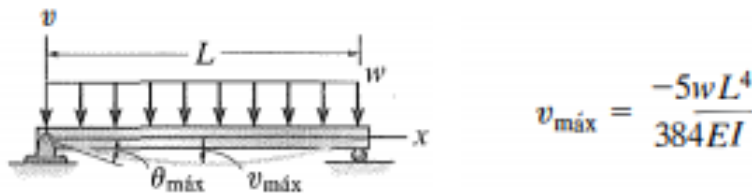
$W_{H_2O}$  - peso distribuído do fluido, N/m.

Figura 10 – Carga distribuída



Fonte: Próprios autores

Para realizar o cálculo utilizou a tabela C - Inclinações e deflexões de vigas de [Hibbeler \(2010\)](#), afim de encontrar o valor de deflexão para o tubo definido. Foi escolhido o modelo simplificado para ser utilizado, o modelo de apoios laterais e com carga distribuída.

Figura 11 –  $V_{máx}$ 

Fonte: ([HIBBELER, 2010](#)).

Após a escolha do modelo foi analisado as incógnitas presentes na fórmula. Para isso foi preciso o cálculo de momento de inércia de área do tubo, no qual foi encontrado o valor de  $I = 6,28 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$ .

A carga distribuída age para baixo, positiva de acordo com convenção de sinal adotada. Os eixos x e y são positivos no sentido para a direita e para baixo, respectivamente. A equação para carga distribuída é:

$$v_{max} = \frac{5 \cdot w \cdot L^4}{384 \cdot E_c \cdot I} \quad (8)$$

Onde:

$L$  - comprimento do tubo;

$w$  - peso distribuído;

$E_c$  - modulo de elasticidade do cobre;

$I$  - momento de inércia do tubo.

### 3.2.6 DETERMINAÇÃO DA MENOR DIMENSÃO ADMISSÍVEL NOS PÉS DA ESTRUTURA

A estrutura tem por finalidade sustentar a parábola, independentemente do ângulo que ela está disposta sobre a mesma. Para isso foi realizado o estudo da menor dimensão dos pés, que a estrutura poderá ter sem que ela tombe. O estudo foi feito apenas considerando as reações dispostas na estrutura e considerando a força que o vento faz sobre ela. Para o início do estudo, deve-se levar em consideração a massa da parábola, sendo de 8 kg no total e a massa proveniente da estrutura, podendo-se ser estimada em 5 kg, considerando a quantidade de material e seu peso específico.

Para encontrar a força exercida pelo vento, realizou-se pesquisas, onde foi encontrada rajada crítica de 34km/h, na região de Arcos-MG (TEMPO, 2019). A força feita na parábola foi considerada como o coeficiente de forma da esfera por mais se aproximar da geometria da parábola, sendo considerada  $C_s = 0,4$  e o coeficiente de altura  $C_H = 1$ , por ser uma estrutura abaixo dos 15,3 m (MAFFRA, 2019). A densidade do ar é dada por 1,23 kg/m<sup>3</sup>, (GERAL, 2019) e considerada a área da placa como 1 m<sup>2</sup>.

Para calcular a força feita pelo vento, utilizou-se a fórmula simplificada (MAFFRA, 2019):

$$F = C_s \cdot C_H \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} \cdot A \quad (9)$$

Onde:

$C_s$  - coeficiente de forma;

$C_H$  - coeficiente de altura;

$\rho$  - densidade do ar;

$V$  - velocidade do vento;

$A$  - área da parábola.

Para encontrar o centro de massa da parábola, o qual em sua posição perpendicular ao apoio provocará o máximo momento sobre a estrutura, foi calculado suas coordenadas no espaço utilizando o conceito de integrais de superfície (Equação 10 e 11) (STEWART, 2017). Considerando  $\rho$  constante, obtém-se:

$$m = \iint_s \rho(x, y, z) dS \quad (10)$$

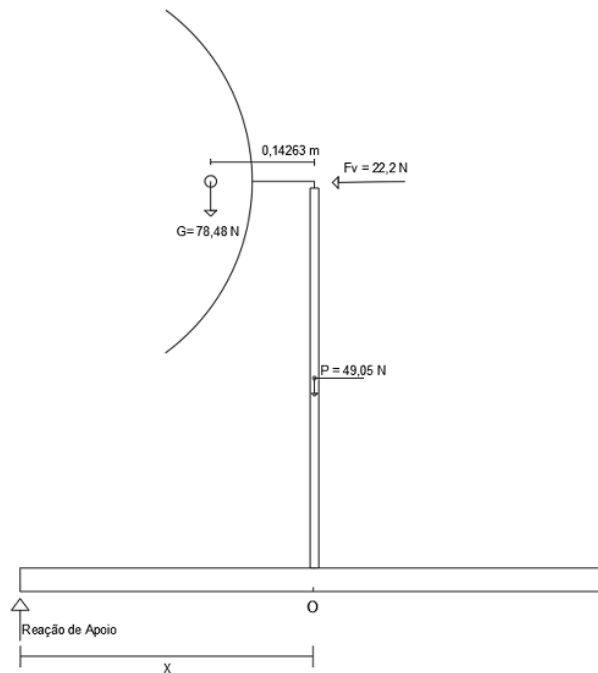
$$\bar{x} = \frac{1}{m} \iint_s x \rho(x, y, z) dS \quad (11)$$

$$\bar{x} = 0,051m \quad \bar{y} = 0 \quad \bar{z} = 0,500m$$

Para uma segunda análise afim de confirmar os resultados foi utilizado o *software Solid Works*, agora considerando a espessura de 2 mm, foi obtido valores semelhantes ao calculado, obtendo  $\bar{x} = 0,047$ .

Em seguida foi feito o diagrama de corpo livre, para melhor visualização dos esforços. No engaste da parábola tem o comprimento de 95mm, onde é somado com a distância do centroide da parábola.

Figura 12 – D.C.L. Estrutura



Fonte: Próprios autores.

Realizando o somatório de forças em Y:

$$\sum F_y = 0 \quad (12)$$

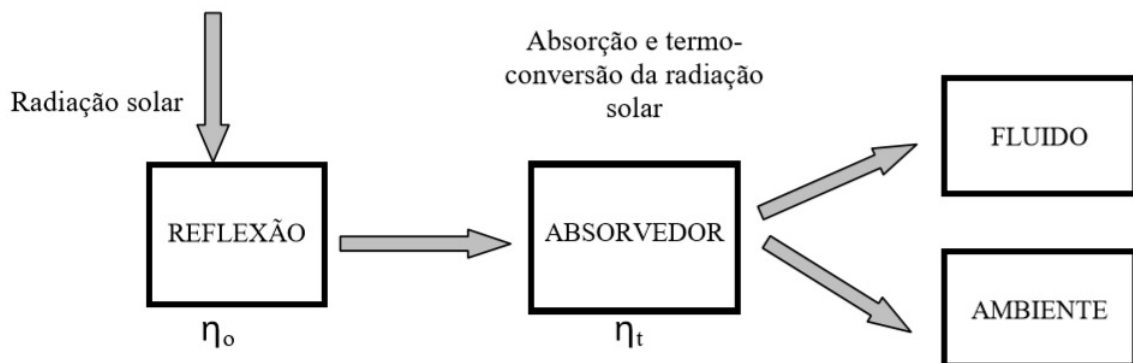
Em seguida realiza-se o somatório de momentos em relação ao ponto O.

$$\sum M_O = 0 \quad (13)$$

### 3.2.7 CÁLCULOS DA EFICIÊNCIA DE AQUECIMENTO DO COLETOR

A conversão da radiação solar em energia térmica é realizada por dois estágios; o primeiro onde a radiação solar é captada através do concentrador solar parabólico e refletida para o tubo absorvedor que está no foco exato do concentrador parabólico; o segundo estágio, como o sistema é fechado, a radiação solar absorvida pelo tubo é transferida para o fluido de trabalho, presente no interior do tubo, por condução e radiação solar é transferida para o ar atmosférico por convecção e radiação (SOUZA, 2008).

Figura 13 – Processo de termoconversão da energia solar.



Fonte: (SOUZA, 2008)

Segundo Souza (2008), a eficiência útil ( $\eta_u$ ) do processo de conversão de um sistema é o produto da eficiência ótica do sistema de captação de energia ( $\eta_o$ ), diretamente dependente do material utilizado na superfície do concentrador, e a eficiência de conversão térmica ( $\eta_t$ ), equação 14. Essa eficiência ( $\eta_u$ ) determina o percentual de toda a energia solar radiante que chega na superfície refletora e é transferida para o fluido de trabalho.

$$\eta_u = \eta_o \cdot \eta_t \quad (14)$$

O tubo recebe a soma da radiação solar direta ( $I_d$ ) em sua superfície e toda a radiação solar ( $I_d$ ) refletida pela área útil do concentrador ( $A_u$ ) com a eficiência ótica do sistema ( $\eta_o$ ) e perde a potência por radiação para o meio ambiente ( $P_{rad}$ ) e potência por convecção ( $P_{conv}$ ).

Para encontrar a eficiência útil de conversão do sistema é necessário conhecer separadamente todos os termos dos cálculos, a começar pela eficiência ótica do sistema de captação de energia solar  $\eta_o$  :

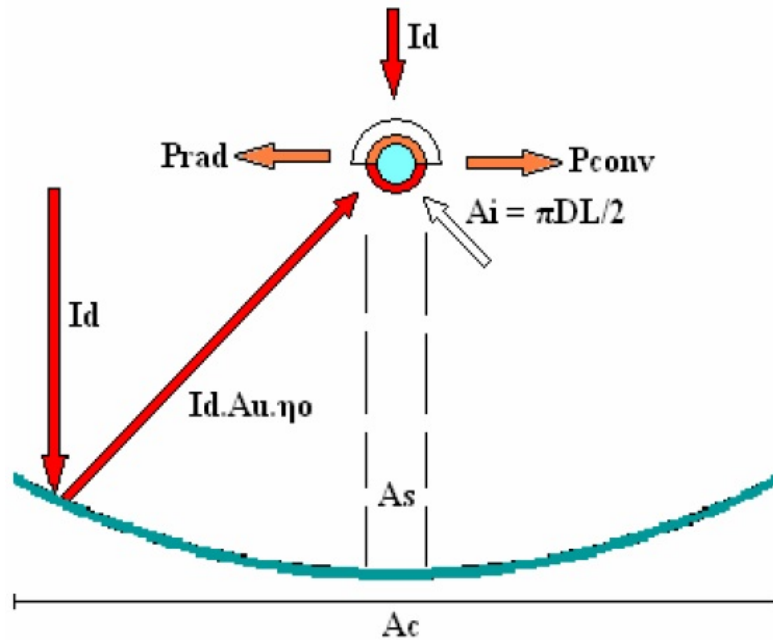
$$\eta_o = \rho \cdot K_{rd} \cdot \alpha_t \quad (15)$$

Onde:

$\rho$  - refletividade do concentrador, de 97% para a película espelhada refletora utilizada;

$K_{rd}$  - fração da radiação refletida que chega no absorvedor, referente as perdas de radiação até o tubo, 0,94;

Figura 14 – Fluxo de energia do concentrador solar



Fonte: (SOUZA, 2008)

$\alpha_t$  - absorvidade do tubo absorvedor de cobre, segundo Souza (2008) de 90%.

Logo em seguida é necessário conhecer a eficiência de conversão térmica ou rendimento térmico ( $\eta_t$ ):

$$\eta_t = \frac{P_u}{P_{abs}} = \frac{P_u}{I_d \cdot A_u \cdot \eta_o} \quad (16)$$

Onde:

$I_d$  - radiação solar direta incidente ( $W/m^2$ ), segundo (CRESESB, 2019) para a cidade de arcos durante o mês de junho é de  $412 W/m^2$ ;

$A_u$  - área útil do concentrador, diferença entre área total da superfície de captação e a área sombreada pelo tubo absorvedor,  $(A_c - A_s) = 0,902m^2$ .

A potência útil do sistema, ( $P_u$ ) em ( $W$ ), é a diferença entre a potência máxima absorvida ( $P_{abs}$ ) e a potência perdida ( $P_{perdida}$ ):

$$P_u = P_{abs} - P_{perdida} \quad (17)$$

A potência perdida é uma das perdas mais difíceis de ser calculadas em um CCP, uma vez que ocorre tanto no tubo absorvedor como na tubulação que leva o fluido térmico até o armazenamento. As perdas térmicas ocorrem por radiação e por convecção, uma vez que perdas por condução é desprezível devido ao isolamento térmico realizado nas áreas de contato do tubo com as estruturas do suporte metálico. De acordo a formulação encontrada em (SOUZA, 2008),

a potência perdida pode ser descrita como:

$$P_{perdida} = P_{conv} + P_{rad} = \bar{h} \cdot A(T_{abs} - T_{amb}) + \varepsilon A \sigma (T_{abs}^4 - T_{amb}^4) \quad (18)$$

Onde:

$\bar{h}$  - coeficiente de transferência convectiva, equação 19;

$A$  - área do tubo absorvedor,  $0,044 \text{ m}^2$ ;

$T_{abs}$  - temperatura do tubo absorvedor, média de  $146^\circ\text{C}$ ,  $419\text{K}$ , via teste;

$T_{amb}$  - temperatura ambiente no dia do teste  $27^\circ\text{C}$ ,  $300\text{K}$ ;

$\varepsilon$  - emissividade do tubo absorvedor, 0,03 adimensional (CONTEMP, 2019);

$\sigma$  - constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ).

O coeficiente de transferência convectiva pode ser determinado por:

$$\bar{h} = Nu \cdot \frac{k}{D} \quad (19)$$

Onde:

$Nu$  - número de Nusselt;

$k$  - condutividade térmica do ar,  $0,023 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , (PROTOLAB, 2019).

O número de Nusselt, pode ser obtido por:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \cdot \left[1 + \left(\frac{Re}{282.000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \quad (20)$$

O número de Reynolds ( $Re$ ), pode ser encontrado por:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (21)$$

Onde:

$Pr$  - número de Prandtl, 0,70 adimensional (WHITE, 2011);

$V$  - velocidade do vento,  $7,8 \text{ m/s}$  (TEMPO, 2019);

$D$  - diâmetro do tubo absorvedor,  $0,028 \text{ m}^2$ ;

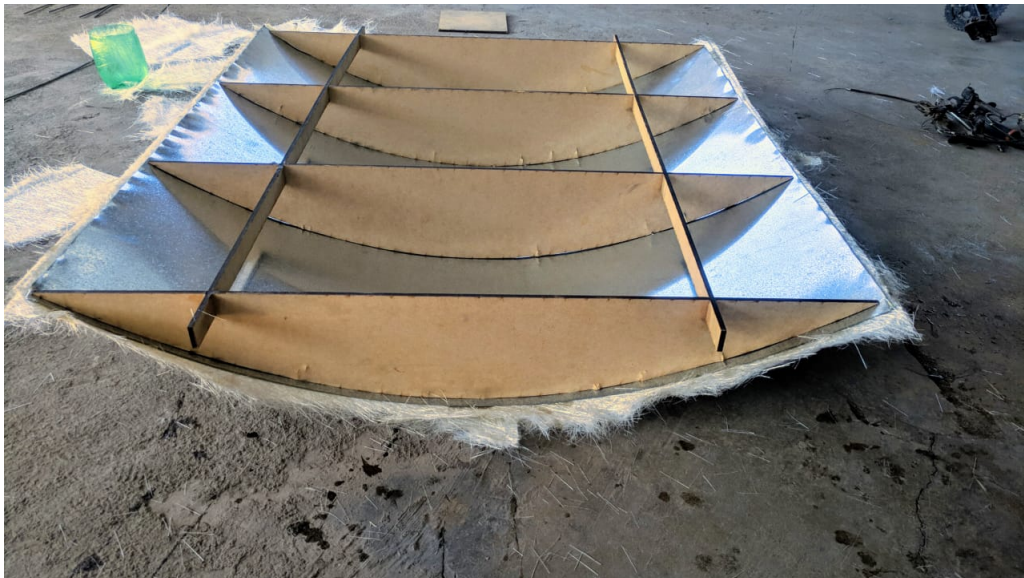
$\nu$  - viscosidade cinemática do ar em temperatura ambiente é de  $1,516 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  (CENGEL; CIMBALA, 2015).

### 3.3 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Para a montagem do protótipo foi utilizado os materiais da tabela 1.

1. Inicialmente usou-se a chapa de zinco, a manta de fibra de vidro e a resina para moldar o formato da parábola. Também foram utilizados moldes de madeira recortados com as medidas que a parábola fique nos padrões calculados pelo o grupo.
2. Após a secagem da resina foi tirado os moldes de madeiras e foi fixado o suporte que segura o concentrador solar na base.
3. A fabricação da base foi terceirizada, pois seria necessário uso de soldas e máquina de corte de metal.
4. Foi utilizado uma película espelhada com 97% de refletividade no concentrador solar é colocado um tubo de cobre (Absorvedor) para que iniciasse os testes.

Figura 15 – Montagem do concentrador solar



Fonte: Próprios autores



## 4 RESULTADOS

### 4.1 DEFLEXÃO TUBO DE COBRE

Para encontrar a deflexão máxima do tubo absorvedor, foi necessário a análise de toda a carga distribuída presente durante o seu comprimento. Portanto, aplicando a equação 8, foi obtido o valor de  $V_{max}$  de 0,000273 m que também equivalente a:

$$V_{max} = 0,273 \text{ mm}$$

### 4.2 DETERMINAÇÃO DO MENOR TAMANHO DO PÉ DA ESTRUTURA

O cálculo do menor tamanho do pé da estrutura foi realizado através dos principais fatores presente na estrutura, sendo o momento máximo que o concentrador poderia realizar e a rajada crítica do vento. Portanto utilizando a equação 12 obteve a reação de apoio de:

$$RA = 127,53 \text{ N}$$

O valor encontrado para  $X$ , conforme a equação 13 será o menor tamanho que o pé da estrutura deve ter para não tombar, sendo de 0,26 m que também equivalente a:

$$X = 26 \text{ cm}$$

### 4.3 CÁLCULOS DA EFICIÊNCIA DE AQUECIMENTO DO COLETOR

Através da equação 21 foi encontrado o número de Reynolds de  $Re = 9.234,83$ .

O número de Nusselt encontrado na equação 20, foi de  $Nu_D = 51,04$ .

A potência perdida por radiação para o meio ambiente é  $P_{rad} = 1,70W$  e a potência perdida por convecção é  $P_{conv} = 219,44W$ , totalizando uma potência perdida  $P_{perdida} = 221,14W$ .

A eficiência de conversão térmica, equação 16, é  $\eta_t = 27,49\%$ .

A eficiência ótica do sistema de captação de energia solar, equação 15, é  $\eta_o = 82,06\%$ .

Com os valores obtidos nas equações de 15 a 21 é possível chegar ao resultado da eficiência útil, equação 14, de conversão do concentrador solar cilindro parabólico de  $\eta_u = 22,56\%$ .

### 4.4 TESTE DO AQUECEDOR SOLAR

Para coletar os dados a serem utilizados nos cálculos o grupo realizou testes no coletor em um período de uma hora e vinte minutos.

O teste foi realizado posicionando o coletor de forma perpendicular ao sol no horário de 12:10 às 13:30 em um dia sem nuvens, onde a velocidade do vento atingiu a média de  $7,8 \text{ m/s}$ , de acordo com as medições de (TEMPO, 2019) para a cidade de Arcos, um tubo de cobre com um diâmetro de 28 mm foi posicionado no foco do cilindro parabólico para mensurar sua temperatura externa e interna, coletando a temperatura na superfície do tubo e da água contida no interior do mesmo. Os dados podem ser vistos na tabela 2.

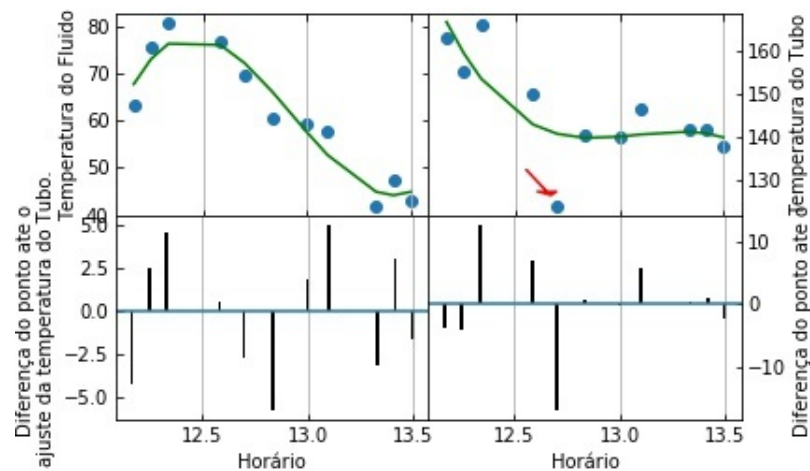
Tabela 2 – Dados de medição

Horário (h)	Temperatura da Água ( $^{\circ}\text{C}$ )	Temperatura do Tubo ( $^{\circ}\text{C}$ )
12:10	63,5	162,9
12:15	75,7	155,2
12:20	81,0	166,1
12:35	76,7	149,8
12:42	69,6	123,8
12:50	60,4	140,4
13:00	59,5	140,0
13:06	57,7	146,3
13:20	41,7	171,7
13:25	47,2	141,7
13:30	43,2	137,7

Fonte: Próprios autores

Com os dados adquiridos na tabela 2, foi feito um ajuste de curva utilizando o software *Python*, a equação utilizada para o ajuste de curva foi uma equação de terceiro grau, (colocar a equação), a seta na figura indica um ponto isolado, ocasionado por um erro de medição no decorrer do teste. A parte debaixo da imagem mostra a distancia de um ponto ao outro, de modo a observar que os pontos ficaram bem próximos, isso indica que não houve uma mudança brusca de temperatura.

Figura 16 – Ajuste dos dados



Fonte: Próprios autores

## 5 CONCLUSÃO

Foram analisados três tipos de sistemas tecnológicos concebidos com a finalidade de converter a radiação solar em outras fontes de energia, sendo escolhido o coletor cilindro parabólico (CCP) que concentra a radiação em um eixo linear focal, além da sua construção ser relativamente simples e eficiente. O foco da parábola foi concebido com o intuito de concentrar todos os raios solares para aquecer o fluido. Após os cálculos foram utilizados dois métodos para verificar a eficiência dos mesmos, através de um experimento em folha A4, laser e do *software Soltrace*, confirmando a exatidão do foco e sua eficiência para apontar para o tubo absorvedor. O valor encontrado de deflexão do tubo foi relativamente baixo, e pode ser ajustado com a própria altura do tubo, sem afetar o propósito do foco. O valor encontrado para a menor dimensão do pé da estrutura foi um valor abaixo do que o utilizado em sua construção. Optou-se em utilizar o tamanho dos pés de 50 cm garantindo que os esforços presentes, a estrutura não tombará.

A potência perdida por radiação para o meio ambiente foi relativamente baixa, enquanto a potência perdida por convecção foi alta. A potência total perdida pelo sistema, relativamente alta comparada com a potência útil, fornece uma eficiência de conversão térmica do sistema do concentrador solar cilindro parabólico de 22,56%, muito próxima da eficiência útil encontrada em trabalhos utilizados como base. Afim de aumentar a eficiência de conversão térmica do sistema, pode se utilizar um tubo com material com propriedades de absorção melhores que as do cobre. Outra melhoria é promover um aumento na área superficial do concentrador solar cilindro parabólico para conceder uma maior potência máxima absorvida.

No teste real foi comprovado a capacidade do concentrador solar cilindro parabólico de aquecer o fluido presente no interior do tubo de cobre, porém a falta de um seguidor solar impossibilitou o funcionamento do mesmo em períodos diferentes de tempo, uma vez que o sol mudava de posição e a parábola não ficava perpendicular.

# REFERÊNCIAS

- BOLES, M.; ÇENGEL, Y. Termodinâmica. 7ª edição. São Paulo: AMGH Editora, 2013. Citado na página 6.
- BRASIL, S. *ORIENTAÇÃO SOLAR*. 2014. Disponível em: <<http://www.strombrasil.com.br/orientacao-solar/>>. Acesso em: 17 de junho de 2019. Citado na página 14.
- CARVALHO, R. M. de. *Análise óptica e térmica de um coletor solar parabólico com tubo evacuado para aplicação em sistemas de refrigeração por absorção*. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 14.
- CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos fluidos-3*. [S.l.]: AMGH Editora, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 22.
- CHAVES, F. D. *ESTUDO EXPERIMENTAL E DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO DE UM REFRIGERADOR POR ABSORÇÃO DE PRESSÃO TOTAL ÚNICA*. Tese (Doutorado), 2009. Citado 3 vezes nas páginas 4, 7 e 11.
- CONTEMP. *Tabelas de Emissividade*. 2019. Disponível em: <[https://contemp.com.br/downloads/pdf/Tabela\\_de\\_Emissividades.pdf](https://contemp.com.br/downloads/pdf/Tabela_de_Emissividades.pdf)>. Acesso em: 26 de junho de 2019. Citado na página 22.
- CRESESB. *Potencial Solar*. 2019. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data/>>. Acesso em: 18 de abril de 2019. Citado na página 21.
- CUNHA, M. M. F. D. *GEOMETRIA DE INSOLAÇÃO – OPTIMIZAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DE ELEMENTOS DE PROTEÇÃO SOLAR*. [S.l.], 2005. Citado na página 15.
- GERAL, C. *Densidade do ar*. 2019. Disponível em: <[https://www.conhecimentogeral.inf.br/densidade\\_do\\_ar/](https://www.conhecimentogeral.inf.br/densidade_do_ar/)>. Acesso em: 27 de junho de 2019. Citado na página 18.
- GÓMEZ, J. M. R. et al. A irradiância solar: conceitos básicos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, n. 40, p. 3312–1 –3312–12, 2018. Citado na página 14.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física, vol. 1: mecânica. LTC. 9ª, 2012. Citado na página 10.
- HIBBELER, R. C. *Resistência dos materiais*. [S.l.]: Pearson Educación, 2010. Citado na página 17.
- KROTH, F. A. *Construção e avaliação de um concentrador solar cilíndrico parabólico para aquecimento de água residencial*. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.
- MAFFRA, S. Álvares. *Projeto Integrado de Estabilidade de Unidades Flutuantes*. 2019. Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/9502/9502\\_5.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/9502/9502_5.PDF)>. Acesso em: 27 de junho de 2019. Citado na página 18.
- NESTOR. *Introdução à engenharia metalúrgica*. 2017. Disponível em: <<http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06638/IEM-Texto-4.pdf>>. Acesso em: 05 de Junho de 2019. Citado na página 16.

- OLIVEIRA, S. de J. et al. Sistemas de refrigeração por absorção. *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, Departamento de Engenharia Mecânica, 2004. Citado na página 7.
- PROTOLAB. *TABELA DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO*. 2019. Disponível em: <<http://www.protolab.com.br/Tabela-Conductividade-Material-Construcao.htm>>. Acesso em: 26 de junho de 2019. Citado na página 22.
- SBRAVATI, A.; SILVA, A. F. S. Refrigeração por absorção. *Unicamp*, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 6, 8 e 9.
- SOUZA, J. R. F. *Projeto, construção e levantamento de desempenho de um concentrador solar parabólico com mecanismo automático de rastreamento solar*. 2008. Citado 3 vezes nas páginas 9, 20 e 21.
- STEINBRUCH, A.; WINTERLE, P. *Geometria analítica*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1987. Citado na página 12.
- STERN, E. *Carta Solar: Para que serve e como utilizá-la*. 2017. Disponível em: <<https://krinatsolar.com.br/carta-solar/>>. Acesso em: 13 de Abril de 2019. Citado na página 15.
- STEWART, J. *Cálculo*. [S.l.]: Cengage Learning, 2017. v. 2. Citado na página 18.
- STOECKER, W. F.; JONES, J. W. *Refrigeração e ar condicionado*. [S.l.]: McGraw-Hill do Brasil, 1985. Citado na página 6.
- TEMPO, C. *Tempo no momento em Arcos - MG*. 2019. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/previsao-do-tempo/cidade/1079/arcos-mg>>. Acesso em: 26 de junho de 2019. Citado 3 vezes nas páginas 18, 22 e 25.
- WHITE, F. M. *MECÂNICA DOS FLUIDOS*. 6. ed. [S.l.]: AMGH Editora Ltda, 2011. Citado na página 22.