



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE PERNAMBUCO  
IFPE – CAMPUS CARUARU

**JOSÉ CÁCIO ALVES CABRAL FILHO**

**PROJETO DE UM CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO  
COMPOSTO (CPC) PARA APLICAÇÃO EM DESSALINIZADOR  
SOLAR NO AGRESTE DE PERNAMBUCO**

**Caruaru - PE**

**2022**

**JOSÉ CÁCIO ALVES CABRAL FILHO**  
**PROJETO DE UM CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO**  
**COMPOSTO (CPC) PARA APLICAÇÃO EM DESSALINIZADOR**  
**SOLAR NO AGRESTE DE PERNAMBUCO.**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Mecânica do Instituto  
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de  
Pernambuco como parte dos requisitos à obtenção  
do título de Engenheiro Mecânico.*

**Orientador: Felipe Vilar da Silva**

**Caruaru – PE**

**2022**

C117p

Cabral Filho, José Cácio Alves

Projeto de um concentrador solar parabólico composto (CPC) para aplicação em dessalinizador solar no agreste de pernambuco / José Cácio Alves Cabral Filho; orientação de Felipe Vilar da Silva. – Caruaru, 2022. 60 f.

Trabalho de Conclusão de Curso – (Graduação em Engenharia Mecânica) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica, Curso de Engenharia Mecânica, 2022.

1. Transferência de calor. 2. Concentrador solar parabólico. 3. Dessalinização. 4. Concentrador parabólico composto. 5. Engenharia Térmica. 10. Engenharia Mecânica - IFPE. I. Silva, Felipe Vilar da. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco. III. Trabalho de Conclusão de Curso. IV. Título.

CDD: 621  
CDU: 621.402

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais que se empenham para me proporcionar felicidade, sendo os únicos e principais pilares da estrutura da minha vida.

Às minhas irmãs que contribuíram muito com a minha jornada.

À minha amada e maravilhosa esposa, por todo o apoio técnico, emocional e imensa paciência comigo.

A todos os meus demais familiares, avó, tios, tias e primos, que me auxiliaram de inúmeras maneiras.

Aos meus professores, por todo apoio e dedicação técnica.

À Felipe Vilar, meu orientador, por todo suporte técnico e orientação.

Ao meu grande Amigo Alexandre, pelo incentivo dado.

Aos meus amigos da faculdade que estiveram junto a mim nessa longa jornada.

# **PROJETO DE UM CONCENTRADOR SOLAR PARABÓLICO COMPOSTO (CPC) PARA APLICAÇÃO EM DESSALINIZADOR SOLAR NO AGRESTE DE PERNAMBUCO.**

## **RESUMO**

O uso de coletores ou concentradores solares para dessalinização da água, é uma tecnologia antiga e presente na vida da comunidade que sofre com longos períodos de estiagens, e tem reservatórios com a presença concentrada de sais, ocasionado em um recurso hídrico salobro. Este tipo de tecnologia oferece uma alternativa de relativo baixo custo de instalação, aliado a uma manutenção simples, barata e de baixa recorrência, além de possuir um custo irrisório ou inexistente com o fornecimento de energia diário. A presente Obra tem como objetivo projetar um concentrador solar parabólico composto, para aplicação em um dessalinizador em uma cidade no interior de Pernambuco, chamada Caruaru. O trabalho aborda os fatores geométricos, como a razão de concentração, geometria das parábolas e eficiência ótica, trazendo uma abordagem matemática e gráfica do concentrador, assim como também faz levantamentos a respeito da energia coletada pelo tubo absorvedor, levando em conta as perdas características para um CPC de Tubos evacuados.

**Palavras-chave:** Energia. Truncamento. CPC. Dessalinizador.

# **STUDY TO REDUCE LOSSES IN THE PROCESS OF CRUSHING LEAD-ACID BATTERIES IN A LEAD METALLURGICAL DUE TO BREAKING, USING WCM'S KAIZEN METHODOLOGY AND KNOWLEDGE ABOUT CENTRIFUGAL PUMPS**

## **ABSTRACT**

The use of solar collectors or concentrators for water desalination is an old technology that is present in the life of a community that suffers from long periods of drought, and has reservoirs with the concentrated presence of salts, resulting in a brackish water resource. This type of technology offers a low-cost alternative for installation, combined with simple, cheap and low-recurrence maintenance, in addition to having a negligible or non-existent cost with the daily energy supply. The present work aims to design a compound parabolic solar concentrator, to be applied in a desalinator in a city in the interior of Pernambuco, called Caruaru. The work addresses geometric factors, such as concentration ratio, parabola geometry and optical efficiency, bringing a mathematical and graphical approach to the concentrator, as well as surveys about the energy collected by the absorber tube, taking into account the characteristic losses for a CPC of Evacuated Tubes.

**Keywords:** Energy. Truncation. CPC. Desalinator.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1 Introdução</b> .....	<b>12</b>
<b>1.2 Objetivo geral do trabalho</b> .....	<b>14</b>
<i>1.2.1 Objetivos específicos</i> .....	<i>14</i>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1 Levantamento básicos do CPC</b> .....	<b>16</b>
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1 Dessalinizador</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2 Concentrador solar</b> .....	<b>24</b>
<b>3.3 Transferência de Calor</b> .....	<b>27</b>
<i>3.3.1 Meios de transferência de calor</i> .....	<i>27</i>
<i>3.3.2 Resistências térmicas</i> .....	<i>28</i>
<i>3.3.3 Coeficientes de transferências de calor para convecção.</i> .....	<i>29</i>
<i>3.3.4 Coeficientes de transferências de calor para radiação</i> .....	<i>32</i>
<i>3.3.5 Primeira lei da termodinâmica.</i> .....	<i>33</i>
<b>3.4 Concentrador parabólico composto</b> .....	<b>33</b>
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>40</b>
<b>4.1 Obtenção de dados técnicos</b> .....	<b>40</b>
<b>4.2 Projeto da calha do CPC</b> .....	<b>40</b>
<b>4.3 Truncamento da calha parabólica</b> .....	<b>41</b>
<b>4.4 Eficiência ótica do sistema</b> .....	<b>42</b>
<b>4.5 Cálculo da energia térmica coletada pelo CPC</b> .....	<b>42</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>43</b>
<b>5.1 Truncamento</b> .....	<b>44</b>
<b>5.2 Eficiência Ótica</b> .....	<b>46</b>
<b>5.3 Temperatura ambiente média</b> .....	<b>47</b>
<b>5.4 Radiação Solar</b> .....	<b>47</b>
<b>5.5 Temperatura do fluido de trabalho</b> .....	<b>49</b>
<b>5.6 Fluido térmico utilizado para análise</b> .....	<b>50</b>
<b>5.7 Perdas térmicas</b> .....	<b>51</b>
<i>5.7.1 Fluxo de calor perdido para o ambiente</i> .....	<i>51</i>
<b>5.8 Energia térmica coletada pelo tubo Absorvedor</b> .....	<b>54</b>

<b>5.9</b>	<b>Cálculo da média de água destilada diariamente .....</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>57</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Correção da posição da calha em função do ângulo de aceitação.....	16
Tabela 2: Relação de concentração e ângulo de aceitação.....	38
Tabela 3: Truncamento do CPC.....	42
Tabela 4: Configuração adotada de truncamento.....	43
Tabela 5: Características óticas do sistema.....	43
Tabela 6: Temperatura média ambiente em função do mês.....	44
Tabela 7: Fluxo de Radiação solar em função da hora e do mês.....	45
Tabela 8: Propriedades físicas do óleo térmico mineral.....	47
Tabela 9: Perdas térmicas sofridas pelo sistema.....	48
Tabela 10: Propriedades para definição da resistência térmica de convecção.....	49
Tabela 11: Características físicas do sistema.....	50
Tabela 12: Resistência térmica de irradiação.....	50
Tabela 13: Resistência térmica de convecção do ambiente externo.....	51
Tabela 14: Energia perdida.....	51
Tabela 15: Energia média coletada pelo CPC.....	52
Tabela 16: Variáveis Termodinâmicas.....	53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Forno solar construído por Lavosier.....	14
Figura 2: Coletor de tubos evacuados.....	15
Figura 3: Coletores comerciais: a) Placas planas, b) CPC e c) coletor de tubos evacuados....	15
Figura 4: CPC com dois tubos evacuados estudado por Hsieh.....	17
Figura 5: Mapa da precipitação média de chuvas.....	18
Figura 6: Processos básicos envolvidos em um dessalinizador térmico.....	20
Figura 7: Estados da água para um diagrama isobárico em função da temperatura e volume específico.....	21
Figura 8: Dessalinizador solar com coletores planos.....	22
Figura 9: Dessalinizador solar com uso de concentradores parabólicos.....	23
Figura 10: Radiação direta, indireta e albedo.....	25
Figura 11: Equinócios e Solstícios.....	25
Figura 12: Troca de Calor em um concentrador solar.....	26
Figura 13: Número de Nusselt.....	29
Figura 14: Correlações empírica para o número de Nusselt.....	30
Figura 15: Gráficos das eficiências de coletores planos, CPC de baixa relação de concentração e coletor de tubos evacuados.....	32
Figura 16: Seções truncadas de um CPC.....	33
Figura 17: Partes geométricas de um CPC.....	33
Figura 18: tipos de CPC e de tubos absorvedores: a) Tubo plano horizontal, b) tubo plano vertical, c) tubo em v invertido e d) tubo circular.....	35
Figura 19: Voluta de um CPC de tubo circular.....	36
Figura 20: Fluxograma da metodologia utilizada.....	37
Figura 21: Voluta de um CPC com relação de concentração igual a 10.....	40
Figura 22: CPC completamente desenvolvido: a) geometria completa e b) Fragmento de parábola e voluta.....	40
Figura 23: Geometria do CPC completo e truncado.....	41
Figura 24: Geometria truncada escolhida.....	42
Figura 25: Representação da temperatura do fluido ativo no CPC.....	45
Figura 26: Condutividade térmica em função da temperatura do óleo mineral.....	46
Figura 27: Sentido do fluxo de calor.....	48

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

CPC: Concentrador Parabólico Composto.

MJ: Mega Joule.

$C_n$ = relação de concentração.

$\theta$ = Ângulo de desenvolvimento das parábolas do CPC.

$\theta_c$ = Ângulo de aceitação do CPC.

$a$ = Raio do tubo absorvedor.

$\rho$ = Fórmula da multiplicação do ângulo de desenvolvimento do CPC com o raio do tubo absorvedor.

$\eta_0$  = Eficiência ótica do sistema.

$\tau_1$  = Transmitância do vidro.

$\tau_2$  = Transmitância do vácuo.

$\langle n \rangle$  = Número médio de reflexões

$\alpha$  = Absortância do tubo concentrador

$L$  = Perdas devido a lacunas

$\rho_r$  = Refletividade da calha parabólica

$r$  = Correção ocasionada pelas perdas de difusão da radiação solar

CD= seção de abertura do CPC.

$W$  = Área de abertura de um CPC não truncado

$H$  = Altura da calha

$x$  = Eixo das ordenadas para o CPC.

$y$  = Eixo das abcissas para o CPC.

KJ= Quilo joules.

$\eta$  = Eficiência térmica do CPC.

$e_{\text{útil}}$  = Energia útil coletada pelo CPC.

$e_{\text{recebida}}$  = Energia que atravessa a área de abertura do CPC

# 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

## 1.1 Introdução

A água é um recurso fundamental para a vida de todos os seres vivos, em especial para os seres humanos, onde esse recurso está atrelado a diversas atividades do cotidiano, como a utilização em atividade de higienização, que é fundamental para a inibição de proliferação de microrganismos nocivos à saúde humana, além de ser inexorável para a hidratação, que é imprescindível para o bom funcionamento das células do corpo humano.

Segundo Olivo e Ishiki (2014), existe uma distribuição desequilibrada desse recurso, em que Saboia e Sampaio (2016), enfatiza que o Brasil possui aproximadamente 12% de toda a reserva de água doce disponível no mundo.

A disponibilidade hídrica também está atrelada à diversos fatores sociais, como a localização da ocupação demográfica, (em que a sociedade tende a se ocupar em regiões próximas a fontes de água potável), assim como o acesso a esse recurso, pode servir como um indicativo para o desenvolvimento econômico de regiões, em que lugares com vazões iguais ou superiores as demandas podem se desenvolver economicamente com maior facilidade (OLIVO E ISHIKI, 2014).

Dentro dos limites demográficos nacionais, ainda existe uma alta divisão da disponibilidade hídrica, onde segundo Olivo e Ishiki (2014), indica que aproximadamente 70% de toda a água doce que se encontra disponível no Brasil, está na região amazônica. Os autores mostram ainda que a região Nordeste, que é caracterizada como uma região árida e menos favorecida de recursos financeiros, comparando com outras regiões brasileiras, possui cerca de 30% de toda população nacional, e conta apenas com 5% de todo o volume hídrico nacional.

A região nordeste também se caracteriza como uma região com uma incidência de chuvas não distribuídas uniformemente ao decorrer do ano, como defende Novais e Mendes (2012), ocasionando longos períodos de estiagem. Com essa afirmação, conseguimos compreender o motivo pela grande necessidade do uso de reservatórios pelas comunidades para armazenamento de água, fazendo-se necessário o consumo dos líquidos presentes em açudes, poços e até mesmo em cisternas.

Outro grande problema que está exposto o povo nordestino, é a qualidade da água disponível para consumo, em que muitas vezes apresenta alta concentração de sais minerais, ocasionando o surgimento de fontes com água salobra, tornando-a imprópria para o consumo humano. Um dos meios de captação da água, consiste na utilização de poços tubulares, onde

esses reservatórios naturais muitas vezes possuem baixa vazão e estão dispostos em regiões com embasamento cristalino, tornando o recurso hídrico uma solução rica em sais.

Quando os recursos hídricos são salobros, existe a possibilidade de tornar esse bem potável, tanto para o consumo humano, animal, e até para irrigação de agriculturas, pois a água salobra pode saturar sais na superfície do solo, ocasionado em impactos nos cultivos. Segundo a Embrapa (2019), a comunidade exposta a esse problema, pode fazer uso de tecnologias que dessalinizam a água (dessalinizadores) conferindo uma vazão com qualidade e quantidade atrativa.

A dessalinização consiste em um processo que busca separar parte dos sais diluídos na água, tornando-a própria ao consumo. Dentre os métodos já existentes em uso, se destacam dois processos, onde segundo Celli (2017), consistem em: térmicos e processos de membrana. Dentro desses processos ainda existem subdivisões de tipos, para os térmicos, que se classificam a destilação solar e a destilação de vários estágios. Já para o processo de membrana, se destacam a dessalinização por eletro diálise e a destilação por osmose reversa.

Para os dessalinizadores térmicos, o fluido passa do estado líquido ao gasoso, fazendo uso da energia de uma fonte de calor, onde o vapor é condicionado a um outro reservatório, deixando os sais e outras partículas para trás.

Segundo Celli (2017), uma das principais desvantagens do uso dos dessalinizadores, consiste no alto custo energético para a produção de água potável, pois em todas as etapas do processo existe uma alta demanda de potência, tornando uma tecnologia com custos consideráveis.

Um das formas de reduzir os custos de produção de água destilada, seria a utilização de uma fonte de energia que seja abundante e que não resulte em custos na sua utilização, também se faz necessário que seja uma fonte limpa, que não agrida diretamente o meio ambiente. Atendendo a todos esses requisitos encontramos como uma fonte em potencial, a energia solar, que é uma fonte inesgotável, limpa e não possui custos diretos. E para a região nordeste, a alta taxa de radiação solar se torna um grande fator de atratividade.

O Brasil se destaca mundialmente pela alta disponibilidade de fontes renováveis de energia, entre elas a solar, que é utilizada muito abaixo da sua capacidade. Quando comparada a utilização da radiação, existem países como a Alemanha, por exemplo, que possui um potencial inferior ao Brasil, porém pode chegar a produção 30 vezes maior de utilização (DINIZ, 2018). Citando ainda Diniz (2018), a distribuição da irradiação solar, não é homogênea, variando de acordo com a latitude e a época do ano. Em que no Brasil se destaca

o Nordeste como a região que possui uma média anual de  $5,52kwh/m^2.dia$  de irradiação solar no plano inclinado e a menor variação dessa incidência durante o ano dentre as demais regiões.

Para a utilização da energia solar faz-se necessário o uso de coletores, que irão converter a energia disponível nos raios solares em energia útil, seja ela térmica, elétrica ou mecânica. Existem diversas tecnologias que recebe esse potencial, se destacando as placas fotovoltaicas, que convertem a energia solar em elétrica, e os concentrador solar, que consegue direcionar a irradiação para uma superfície que tem por finalidade aquecer a matéria ali disponível.

Dentre todos os tipos de concentradores solares, existe um denominado Concentrador Parabólico Composto CPC, que consiste em uma curva com parábolas com focos em diferentes pontos, onde segundo Julieta (2010), esse tipo de concentrador possui as qualidades dos concentradores parabólicos e os de placas planas, concentrando a radiação solar ao mesmo tempo em que retém a radiação estática e difusa que são características dos coletores planos.

## 1.2 **Objetivo geral do trabalho**

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver o projeto de uma calha para um concentrador solar do tipo parabólico composto (CPC), possuindo como justificativa a sua utilização em um dessalinizador de água proveniente de reservatórios localizados no Nordeste brasileiro.

### 1.2.1 **Objetivos específicos**

- Desenvolver a geometria da calha do concentrador parabólico composto, que atenda às necessidades de dessalinização da água;
- Levantar a quantidade de energia térmica absorvida pelo tubo absorvedor;
- Desenvolver a calha parabólica de forma econômica, utilizando a menor demanda de material possível.

## 2 **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A crescente demanda de energia, que acompanha o desenvolvimento tecnológico e a ascensão populacional, faz com que a sociedade busque a utilização cada vez mais de fontes de energia para atender as demandas básicas do cotidiano, como a utilização de aquecedores de

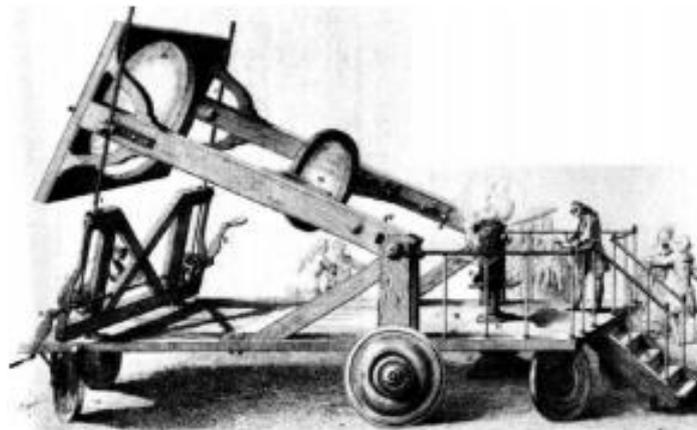
água, como no caso dos chuveiros elétricos, que aquecem o fluido com o intuito de tornar o ato de banhar-se mais agradável, quando a temperatura ambiente está considerada fria.

A Utilização de energia solar, é de uso antigo pelas sociedades anteriores, onde segundo Lodi (2011, apud Cardoso, 2016, p. 17), as primeiras utilizações desse tipo de energia, consistiam na manipulação de alimentos, com o propósito de aumentar sua durabilidade, como no caso de processos de secagem.

Segundo Kalogirou (2013, p. 20 -21), afirma que as primeiras aplicações com o uso de energia solar, foi com coletores de concentração, possuindo a necessidade de seguir o sol, onde o mesmo autor, cita a construção no século XVIII, de fornos solares capazes de fundir metais, sendo construídos de ferro polido, lentes de vidros e espelho, sendo utilizados em toda a Europa e Oriente Médio.

Ainda citando Kalogirou (2013), uma das primeiras aplicações em grande escala, foi o forno construído pelo francês Lavoisier, que por volta de 1774 conseguiu construir lentes para concentrar a radiação solar, atingindo a temperatura de 1750° C, utilizando uma lente de 1,32m, em conjunto com uma secundária de 0,2m como mostra a figura abaixo.

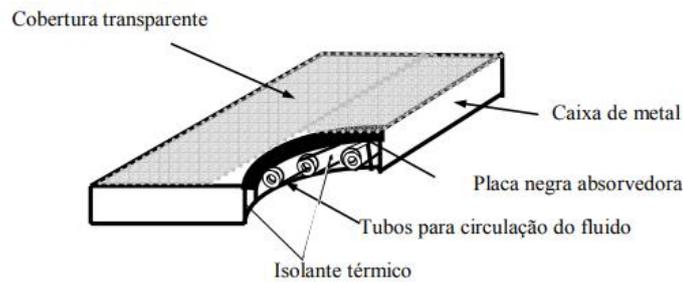
Figura 1 - Forno solar construído por Lavoisier.



Fonte: Kalogirou, 2014.

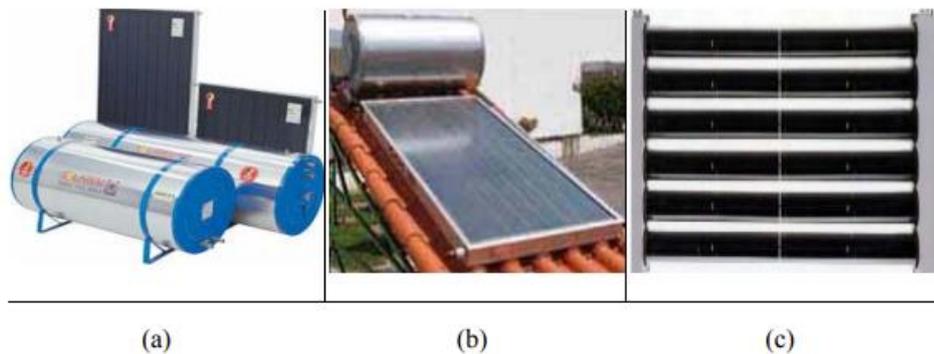
Segundo Brandão (2004, p. 6-10), já existem coletores e concentradores solar, que já são vendidos comercialmente (ver figuras abaixo), ou que estejam próximos de serem comercializados para atender demandas civis, ou até industriais com trocadores de calor com temperatura de operação de até 240 °C, sendo eles classificados em coletores planos, coletores de tubos evacuados e os famosos CPCs.

Figura 2 - Coletor de tubos evacuados.



Fonte: Brandão, 2004.

Figura 3 - Coletores comerciais: a) Placas planas, b) CPC e c) Coletor de tubos evacuados



Fonte: Brandão, 2004.

## 2.1 Levantamento básicos do CPC

Segundo O’Gallagher (2008), a ótica de não imagem (teoria fundada para o desenvolvimento dos CPCs), é uma forma nova de abordar a coleta, concentração e transporte da luz, que foi desenvolvida por físicos da universidade de Chicago nos últimos 35 anos, possuindo por ideia básica, relaxar as restrições do mapeamento de ópticas de imagem, que não seja essencial, onde o objetivo é coletar o máximo de luz possível.

O mesmo autor ainda afirma, que após o uso dessas teorias, foi possível desenvolver concentradores que fossem estacionários, sem a necessidade de mapear o sol, possuindo uma concentração atrativa, muitas vezes podendo atingir o limite termodinâmico para concentração. Onde, para concentrações, entre 1,1 e 2, podem ser utilizados concentradores totalmente estacionários (concentrador fixo durante todo o ano), e conseqüentemente para relações de concentrações mais altas (concentração de 3 até 10), se faz necessário ajustes durante o ano, e para valores maiores que 10, se faz necessário o uso de rastreamento solar para atingir um tempo hábil de coleta de energia.

Um grandioso estudo que faz um levantamento das quantidades de correções da posição do CPC ao longo do ano foi desenvolvido por Rabl (1976), onde para uma quantidade mínima de coleta de 7 horas de irradiação solar, foi indicado a quantidade de vezes que deveria ser atualizada a posição do concentrador para atender esse requisito em função da sua relação de concentração, como mostrada a tabela a seguir.

Tabela 1 - Correção da posição da calha em função do ângulo de aceitação.

Ângulo de aceitação $\theta_c$ (concentração ideal para espelho perfeito e sol pontual)	Tempo de coleta ao longo do ano (horas/dia)	Número de ajustes/ano	Período sem ajuste.	Tempo médio de coleta de a inclinação for ajustada todos os dias (horas/dia)
19,5° (3,0)	9,22	2	180 dias	10,72
14° (4,13)	8,76	4	35 dias	10,04
11° (5,24)	8,60	6	35 dias	9,52
9° (6,39)	8,38	10	24 dias	9,08
8° (7,19)	8,22	14	16 dias	8,82
7° (8,21)	8,04	20	13 dias	8,54
6,5° (8,83)	7,96	26	9 dias	8,36
6° (9,57)	7,78	80	1 dia	8,18
5,5° (10,43)	7,60	84	1 dia	8,00

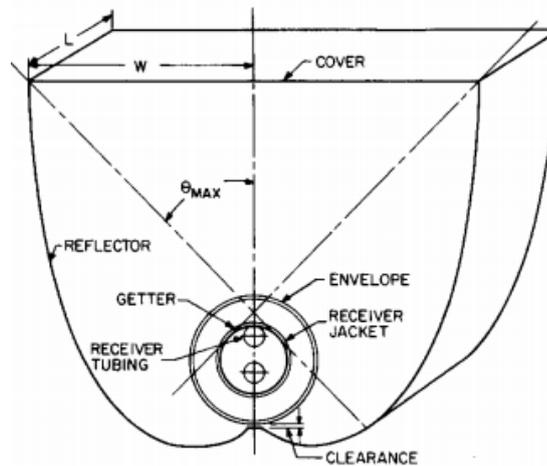
Fonte: Rabl, 1976.

A relação de concentração máxima permitida pela segunda lei da termodinâmica, foi apresentada por Winston e Welford (1978), Rabl (1976) e citado por Brandão (2004), onde foi mostrada uma solução para os concentradores parabólicos compostos de duas e três dimensões, possuindo por variáveis o meio ao qual está exposto o concentrador solar, e o ângulo de aceitação da calha parabólica.

Um dos grandes pioneiros no estudo detalhado do comportamento térmico dos CPC com dois tubos evacuados, foi utilizado por Hsieh (1981), de acordo com o modelo esquematizado na figura abaixo. O autor foi capaz de descrever com matemática detalhada,

discutindo diversos aspectos do concentrador, como por exemplos os efeitos das perdas térmicas, entre outros fatores.

Figura 4 - CPC com dois tubos evacuados estudado por Hsieh.



Fonte: Hsieh, 1981.

Em 1979, Rabl, Goodman e Winston, fizeram um estudo de grande relevância para o desenvolvimento dos concentradores solar parabólico composto, sendo realizado um levantamento a respeito da configuração dos tubos absorvedores, podendo ser lineares, circulares, e tubo em v invertido, onde para cada tipo de tubo, requer um projeto específico de calha para atender as demandas de cada tipo de projeto.

Rabl (1976), também desenvolveu teorias a respeito do comportamento térmico e ótico para os concentradores solar, fazendo levantamento a respeito do número médio de reflexões, assim como estudos de truncamento da calha parabólica, onde essa característica está diretamente atrelada ao uso de material para a confecção do CPC, sabendo que um concentrador completamente desenvolvido consta de seções com comprimentos consideráveis e que contribuem muito pouco com o fator de concentração.

Outro estudo importante para os CPC, consiste na obra realizada por Brandão (2004) que desenvolveu um CPC de baixa concentração com tubo em V invertido aplicado na cidade do Recife-Pe. Esse projeto foi desenvolvido para relações de 1 até 2, para geometrias truncadas e não truncadas, podendo chegar até próximo de 3200 MJ por metro quadrado de energia coletada anualmente, a depender das características descritas a cima.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Dessalinizador

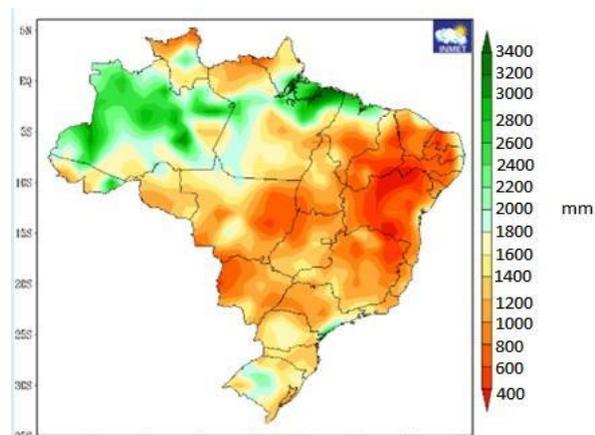
Apesar do Brasil ser considerado muito abundante em recursos hídricos como afirma Adailton (2017), esse recurso não é distribuído uniformemente entre todas as regiões do país, ocasionando em regiões com altos índices pluviométricos, como é o caso da região sudeste, por exemplo, e de regiões com escassez de água como ocorre na região nordeste.

Como a água é considerada um recurso essencial para a sobrevivência, uma população que está exposta a níveis insuficientes desse bem, convive com diversos problemas diretos e indiretos. As atividades que necessitam de recursos hídricos são afetadas diretamente, como é o caso da agropecuária, que necessita de água, seja para os cultivos de agriculturas, ou até mesmo para a criação de rebanhos, onde ambos possuem suas produtividades afetadas diretamente pela baixa disponibilidade hídrica.

De acordo com o censo realizado pelo IBGE (2010), o Nordeste conta com mais de 54 milhões de habitantes, sendo a segunda maior do Brasil, perdendo apenas para a região sudeste, que conta com mais de 82 milhões de habitantes. O agravante da região nordeste ser uma das mais populosas do Brasil e com a menor distribuição de água, deixa evidente mais um grande problema, em que essa população enfrenta uma menor distribuição de água por habitante tendo efeitos diretos sobre diversos aspectos, entre eles o econômico.

Fazendo uso dos dados do INMET, a imagem ilustra dados a respeito da precipitação de chuvas relativas ao ano de 2019, que mostra a enorme diferença da média de chuvas sobre o contexto nacional, onde verificamos que algumas partes da região nordeste podem marcar precipitação inferior a 600 mm/ano.

Figura 5 - Mapa da precipitação média de chuvas.



Fonte: INMET, 2019. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index>.

Segundo Adailton (2017), a população que enfrenta longos períodos de estiagem busca outras fontes de água para suprir a demanda diária, como é o caso da utilização de águas subterrâneas, obtidas através de poços, que possuem um solo de alta salinidade provocadas por rochas cristalinas.

A exposição da água de poços a solos salinos, contribuem mais fortemente para a saturação de minerais diluídos no soluto, tornando o recurso indisponível para o consumo humano, ou até mesmo para a utilização em outras atividades, como é o caso da agricultura, que pode ter os solos superficiais contaminados pelos minerais da água salobra ou salina.

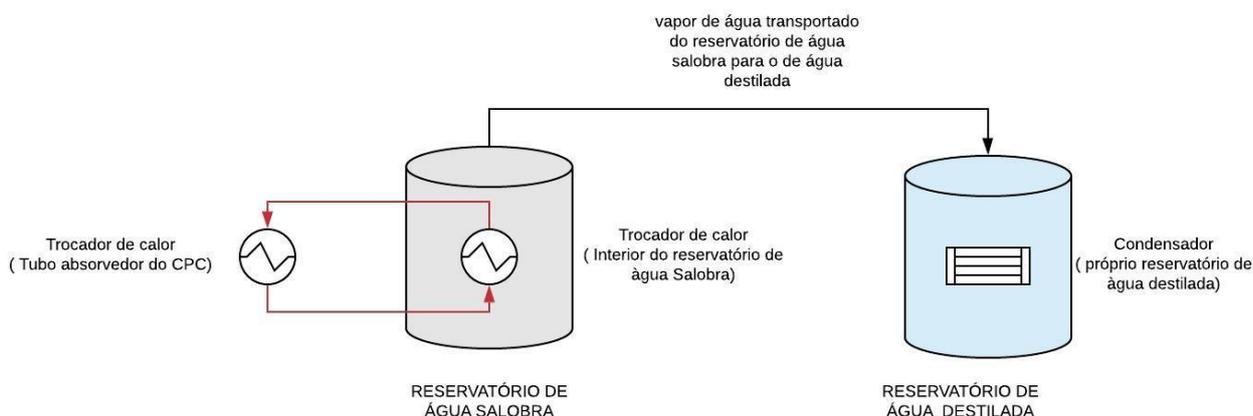
Fazendo uso das definições abordadas pelo CONAMA (2005) na resolução nº 357, que estabelece que a água doce deve ter salinidade igual ou inferior a 500  $\mu\text{g/l}$ , para água salobra, salinidade superior a 500  $\mu\text{g/l}$  e inferior a 30,0  $\text{mg/l}$ , e para águas salinas, valores superiores a 30,0  $\text{mg/l}$ . O consumo de água que não é doce pode provocar diversos tipos de problemas a saúde do indivíduo que venha a consumir.

Para as áreas que convivem com águas salinas ou salobras, se faz necessário o tratamento desses recursos, para a diminuição dos solventes presentes, tornando-as assim potável. A forma de tratamento mais aparente para tratamento desse recurso é a dessalinização, que além de reduzir os sais presentes na água, também pode contribuir com a eliminação de matérias danosas a saúde do indivíduo, como é o caso das bactérias, por exemplo.

Para os dessalinizadores que tornam a água salobra ou salina em doce, se dividem basicamente em dois tipos, segundo Jordão (2013), os processos são classificados em térmicos, e nos processos por membrana. Dando ênfase aos processos térmicos, que é um dos objetivos do presente estudo, esses se dividem em destilação convencional, a destilação de multe estágio, destilação com o uso da aplicação de baixas pressões e destilação por congelamento.

Para a presente obra, apenas processos térmicos que elevem a temperatura da água serão levantados, como é o caso da destilação convencional. Esses tipos de dessalinizadores se baseiam no princípio de mudança de fase do recurso hídrico, onde este passa de líquido ao estado gasoso (vapor) após ultrapassar a ebulição, que dependem diretamente de dois fatores, a temperatura e a pressão do fluido. O conceito básico dos destiladores térmicos está representado na figura abaixo.

Figura 6 - Processos básicos envolvidos em um dessalinizador térmico.



Fonte: própria autoria.

Os destiladores térmicos basicamente consistem em um reservatório de água bruta, que logo em seguida passa por um processo de troca de calor em que a água passa de líquido a vapor, deixando os sais precipitados. O vapor já destilado é conduzido para um segundo trocador de calor que permite que o fluido perca energia, passando a condensado, e logo em seguida é conduzido para um reservatório de água destilada. Segundo Jordão (2013), diz que se faz necessário suplementar a água destilada com sais minerais para poder torná-la potável.

A justificativa para essa configuração é explicada por Çengel (2013), que afirma que um gás tem suas partículas espaçadas em formas desordenadas e estão em um estado de energia mais elevado, sendo necessário a perda desse “excesso” de energia para voltarem ao estado líquido, e uma quantidade ainda maior para chegar ao estado sólido.

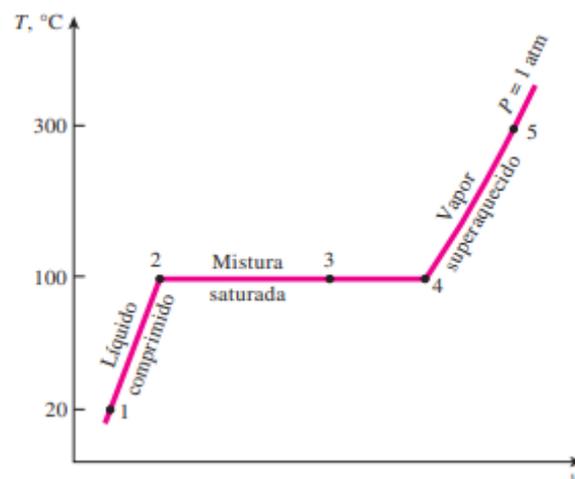
Fazendo uso do diagrama da figura 7, que corresponde ao aquecimento de um fluido a pressão constante, percebemos que a água pode se encontrar no estado de líquido comprimido (entre os pontos 1 e 2), líquido saturado no ponto 2, mistura saturada entre os pontos 2 e 4, vapor saturado no ponto 4, e vapor superaquecido a partir do ponto 4.

Segundo Çengel e Boles (2013), a água no estado de líquido comprimido corresponde a água na iminência de se transformar em vapor, enquanto que no estado de líquido saturado está em uma condição, que o mínimo de energia adicionada faz com que o fluido inicie a se transformar em vapor saturado, existindo então a mistura de duas fases (líquido saturado e vapor saturado).

Segundo os mesmos autores, após o início da fase de mistura, a temperatura do fluido não cresce, e a energia adicionada durante esse processo apenas faz com que o fluido passe inteiramente a vapor (calor latente), e logo após essa transformação o fluido volta novamente a se aquecer caso seja adicionado energia (calor específico), onde nessa configuração o vapor passa a ser chamado de superaquecido, que compreende a iminência de se transformar em líquido. O mesmo processo ocorre no resfriamento de um fluido, porém seguindo a ordem inversa.

A justificativa para a utilização desse ciclo termodinâmico é explicado pelo processo de destilação de substâncias, que segundo Atkins e Jones (2011), afirma que a destilação se baseia na diferença de temperatura do ponto de ebulição de substâncias em solução, como no caso de uma solução de água e cloreto de sódio (sal de cozinha), onde o mineral inicia a fundir em  $801^{\circ}\text{C}$  sob a pressão atmosférica, e a água inicia o processo de vaporização a  $100^{\circ}\text{C}$ , permitindo que esta passe ao estado de vapor e o sal continue sólido, sendo possível a separação dessas substâncias através da condução do gás a um reservatório secundário, sendo posteriormente convertido em condensado como já explicado acima.

Figura 7 - Estados da água para um diagrama isobárico em função da temperatura e volume específico.



Fonte: Çengel e Boles, 2013, p.115.

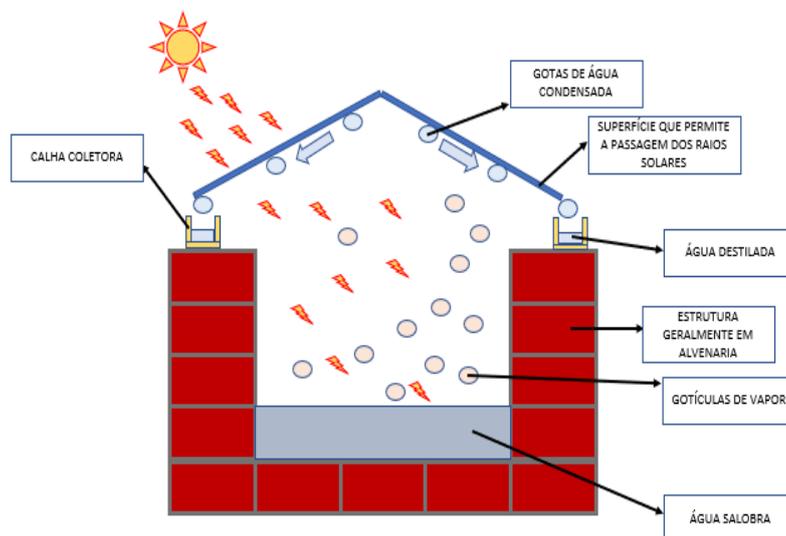
Para os dessalinizadores térmicos que utilizam energia solar, podemos classificá-los em dois tipos, primeiros os dessalinizadores que utilizam coletores solares planos e os dessalinizadores que utilizam concentradores solares.

Como mostrado na figura abaixo, a água recebe os raios solares, que ultrapassam uma superfície geralmente de vidro, que além de permitir a passagem da radiação, faz com que o reservatório passe a aquecer através de um efeito chamado estufa. Com isso a água se aquece e passa a surgir gotículas de vapor que ao entrar em contato com a superfície do vidro que está a uma temperatura mais baixa, se condensa.

Segundo Marinho et al (2015) a água após ter passado do estado de vapor ao líquido, é conduzido para canaletas (chamadas de calha coletora na figura), que através de tubulações conduzem o líquido destilado para um outro reservatório.

Nos estudos desenvolvidos por Marinho et al (2012), aplicação desse tipo de dessalinizador trouxe resultados interessantes, onde foi conseguindo uma média de 16,5 litros/dia de água destilada, onde o reservatório chegou a marcar uma diferença de 15,3°C a mais da temperatura ambiente, esse estudo foi realizado em Campina Grande, PB.

Figura 8 - Dessalinizador solar com coletores planos.



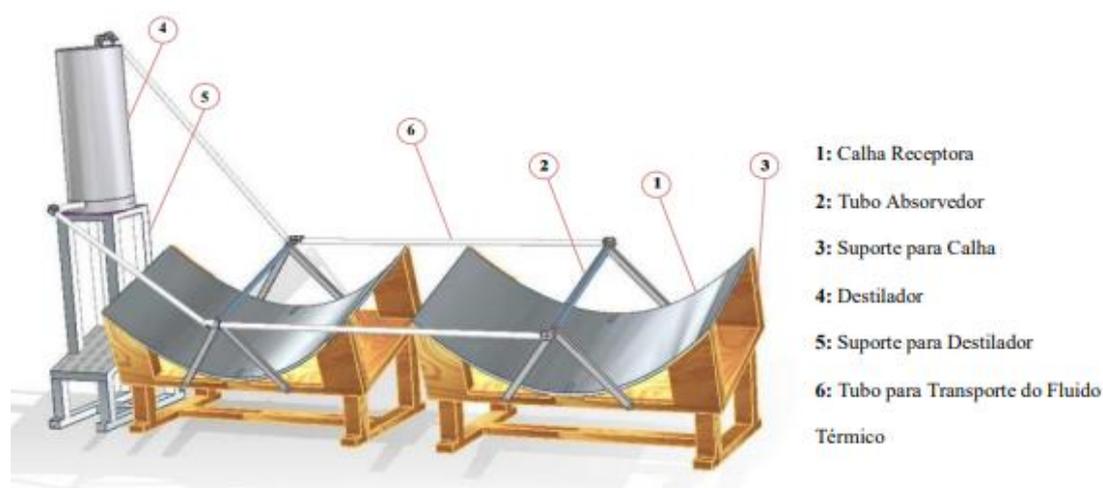
Fonte: Própria autoria.

Para o segundo tipo de dessalinizador citado acima, temos os que utilizam concentradores solares para captação da energia térmica do sol. A água passa pelos mesmos processos exibidos na figura 8, a grande diferença é que ao invés de serem utilizadas superfícies planas para captação da radiação, esse fenômeno será substituído por uma geometria curva, que

consegue direcionar os raios incidentes de uma determinada área maior, para uma área específica e menor, ou seja, concentrando a radiação do sol através de um ponto, ou de uma superfície linear, no caso dos tubos absorvedores. A figura 9, nos mostra alguma das configurações disponíveis para dessalinizadores solar que utiliza superfícies curvas (parábolas) para uso da energia heliotérmica.

Segundo Pinho e Galdino (2014), os coletores concentradores podem ser aplicados principalmente em atividades que requerem temperaturas no intervalo de 100 ° C a 400 ° C, geralmente para aplicações em ciclos de potência para geração de energia elétrica. Enquanto os coletores planos, são aplicados em atividades que requerem temperaturas inferiores (cerca de 60°C), que geralmente são utilizados em projetos residenciais e comerciais, como aquecimentos de piscinas ou de água para limpezas de hospitais.

Figura 9 - Dessalinizador solar com uso de concentradores parabólicos.



Fonte: Silva, et al (2016, p.05)

O comportamento para concentradores do tipo parabólico composto (que é o objeto de estudo dessa obra), será descrito com maiores detalhes na seção a seguir.

### 3.2 Concentrador solar

Segundo Adailton (2017), a energia proveniente dos raios solares pode ser utilizada em três processos, que são eles os térmicos, fotovoltaicos e químicos. Todos os três processos de utilização tem grande importância para a sociedade, onde essas formas de energia, geralmente considerada de produção limpa, contribui diretamente para redução do uso de fontes de energias

não limpas, como é o caso das termoelétricas que utiliza do processo exotérmico da queima de combustíveis (geralmente fósseis), para obtenção de energia elétrica, esse método pode ser substituído ou reduzido o seu uso com ciclos de potência com energia solar, ou até mesmo com o uso de placas fotovoltaicas.

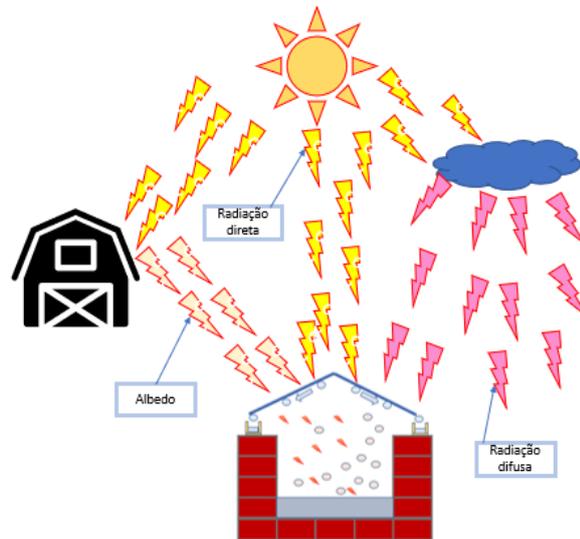
Segundo Pinho e Galdino (2014), estima-se que cerca de 94 mil TW de potência é fornecida efetivamente a superfície terrestre. Os autores afirmam ainda que, em 2011 o consumo energético pela população foi por volta de 143 mil TWh, realizando os cálculos com as informações descritas acima, seria necessário menos de duas horas para que a potência de energia solar na superfície suprisse a demanda de um ano de toda a população mundial.

A energia solar, além de ser uma fonte renovável, também é uma fonte extremamente abundante, além do mais, é um tipo de energia que pode ser construído mecanismos de coleta em áreas que estão em desuso, fazendo com que se tenha uma redução do uso de lugares disponíveis utilizados na obtenção de energias (como as hidroelétricas que se faz necessário o uso de grandes áreas para construção, gerando impactos naturais e muitas vezes sociais) podendo esses espaços serem conservados, quando forem naturais, ou serem utilizados para outras atividades sociais, no caso dos centros urbanos ou rurais.

Essas áreas citadas acima, consistem por exemplo, em áreas como os telhados de residências, que são ambientes não utilizados pela sociedade, um lugar ideal para a coleta dos raios solares, que nesse caso podem ser utilizados tanto para a geração de energia elétrica, como é o caso das placas fotovoltaicas, como na obtenção de energia térmica, servindo para aquecer a água que é importante para diversas atividades do dia-a-dia.

Segundo Pinho e Galdino (2014), a radiação que chega a superfície possui basicamente 3 componentes, que constituem em direta, difusa e albedo, onde a componente direta é recebida diretamente do sol, a radiação difusa é proveniente de outras direções, enquanto o albedo é proveniente da radiação solar refletida de outras superfícies (ver figura 10). Mesmo em dias totalmente isentos de nuvens, a radiação difusa corresponde a 20 % da radiação que atinge a superfície.

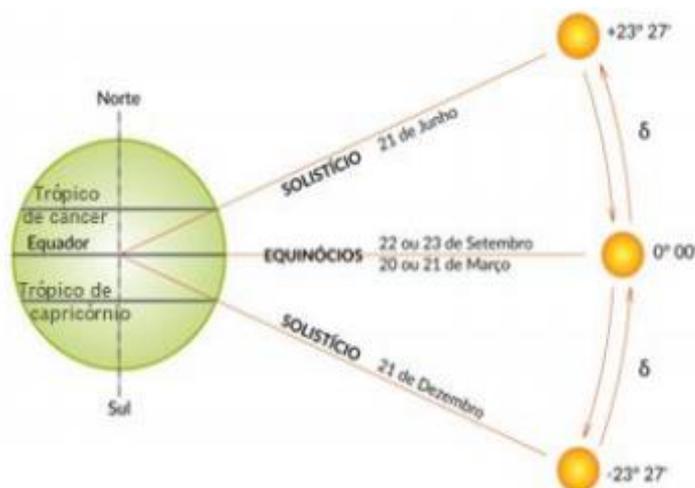
Figura 10 - Radiação direta, indireta e albedo.



Fonte: Própria autoria.

Segundo Carvalho (2018), afirma que o ângulo de incidência, consiste na angulação formada pelo vetor radiação direta e o vetor normal à superfície da terra que, é diretamente afetado pela declinação do sol e o horário do dia. Para o ângulo de declinação, que consiste na posição solar ao meio dia em relação a linha do equador, varia de  $+23^{\circ}27'$  para o trópico de câncer e  $-23^{\circ}27'$  para o trópico de capricórnio, ambos variando anualmente. Esses dados são esquematizados na figura abaixo.

Figura 11 - Equinócios e Solstícios.



Fonte: Carvalho, 2018, p. 22.

(INPE (2017) adaptado pela autora)

Essa variação do posicionamento do sol relativo à terra, é explicado através dos movimentos executado pelo planeta ao redor do sol (movimento de translação) e o movimento rotacional ao redor do seu próprio eixo. Com isso as direções dos raios solares diretos sofrem variação ao decorrer do ano (como já explicado acima), fazendo com que seja necessário ajustar a posição dos concentradores solar para que essa direção seja sempre captada pela geometria da calha.

### **3.3 Transferência de Calor**

#### **3.3.1 Meios de transferência de calor**

Segundo Incropera et al (2008), a explicação para a condução de calor consiste na transferência de energia das partículas que estão sob uma condição superior de energia, para as partículas que se encontram em um estado inferior, ocasionado pelas interações que ocorrem entre as partículas.

De acordo Halliday, Resnick e Walker (2012, p. 204), a convecção consiste quando uma superfície de temperatura mais elevada está em contato com um fluido, onde este recebe calor, se tornando menos denso, permitindo que uma outra parte do fluido a uma temperatura mais baixa passe a trocar calor com a superfície quente e assim esse ciclo sempre se repete até que a diferença de temperatura entre os dois seja nula.

Para a convecção descrita acima, a denominamos de convecção natural, porém existe a convecção forçada, que ocorre quando existe o escoamento de um fluido que está em contato com uma superfície, no qual existindo um gradiente de temperatura entre os dois, irá ocorrer uma transferência de calor.

Como afirma Incropera et al. (2008, p. 64), a radiação consiste em energia emitida por qualquer matéria a uma temperatura acima de zero Kelvin, através de ondas eletromagnéticas. Ao contrário da convecção e condução, a transferência de calor da radiação não necessita de um meio para a troca de energia térmica, sendo essa propagação mais eficiente no vácuo.

Figura 12 - Troca de Calor em um concentrador solar.



Fonte: Própria autoria.

Como mostrado na imagem acima, a transferência de energia térmica para o fluido, consiste primeiro no aquecimento da superfície externa do tubo absorvedor provocada pela concentração da irradiação solar que é direcionada para o tubo absorvedor. Desconsiderando as perdas de energia para o ambiente externo, o fluxo de calor fornecido pela irradiação solar é igual ao fluxo transmitido pela condução através da parede do tubo somado ao fluxo de perdas de calor para o ambiente, onde o calor transmitido pelo tubo aquece a superfície interna, fazendo com que o fluido receba a energia térmica por condução e/ou convecção (natural ou forçada), a depender da existência ou não do escoamento do fluido.

### 3.3.2 Resistências térmicas

Para sistemas elétricos, a lei de Ohm estabelece que a corrente, que atravessa um material condutor, está relacionada com a diferença de potencial entre dois pontos e com a resistência elétrica entre esses pontos. Para sistemas térmicos com a existência da troca de calor, podemos assimilar esse pensamento, relacionando o fluxo de calor de acordo com a diferença de potencial térmico entre materiais (diferença de temperatura) com a resistência térmica existente entre os meios. De acordo com Incropera et al (2008, p. 64) a resistência pode ser definida como a razão entre um potencial motriz e uma taxa de transferência.

Assim como ocorre em circuitos elétricos, as resistências térmicas podem estar associadas em série e/ou em paralelo, e conseqüentemente, podem ser substituídas por uma resistência equivalente. As resistências térmicas variam ainda em função da geometria do corpo (superfície plana, cilíndrica ou esférica), assim como em função da forma da transferência de calor (condução, convecção e radiação).

De forma geral, as resistências relacionadas a condução ( $R_{condução}$ ), convecção ( $R_{convecção}$ ), e radiação ( $R_{Radiação}$ ), estão representadas abaixo, ao qual  $K$  representa a condução térmica do material,  $A$  representa a área da troca de calor,  $L$  representa o comprimento do corpo. O coeficiente de transferência térmica com convecção, está representado por  $h$ , e o coeficiente de transferência térmica com radiação está representado por  $h_{rad}$ .

$$R_{condução} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (3.1)$$

$$R_{convecção} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (3.2)$$

$$R_{Radiação} = \frac{1}{h_{rad} \cdot A} \quad (3.3)$$

### 3.3.3 Coeficientes de transferências de calor para convecção

O mecanismo de transferência de calor relacionado a convecção pode acontecer de dois modos, relacionados às forças de inercias (convecção forçada) ou relacionadas às forças de empuxo (convecção natural). Com isso, quando o escoamento de um fluido é realizado de forma mecânica, tais quais, executados por; ventiladores, exaustores ou compressores, o coeficiente de transferência de calor, é definido em função do número de Nusselt, do número de Reynolds, e do número de Prandt.

Para o número de Nusselt, Çengel (2009, p. 358) afirma que esse valor adimensional, “representa o aumento da transferência de calor através de uma camada de fluido como resultado da convecção em relação à condução do mesmo fluido em toda camada”.

A equação que relaciona o número de Nusselt, está representado logo abaixo, no qual  $l_c$  representa o comprimento característico,  $k$  representa a condutividade térmica do fluido, e  $h$  representa o coeficiente de transferência de calor por convecção. O número de Nusselt também pode ser representado por ser representado por uma função que varia de acordo com a geometria do corpo em análise, o número de Reynolds e o número de Prandt.

$$Nu = \frac{h.l_c}{k} \quad (3.4)$$

Para o número de Reynolds, temos um valor adimensional que relaciona o grau de influência das forças viscosas às forças de pressão. Fox, Mcdonald e Pritchard (2014), estabelecem que se os efeitos viscosos forem desprezíveis, o número de Reynolds retorna um alto valor, e quando o resultado desse termo adimensional for pequeno, os efeitos viscosos serão dominantes. A equação que expressa o número de Reynolds está apresentada abaixo, e representa os seguintes fatores:  $V$  representa a velocidade do fluido,  $l$  representa o comprimento característico, e  $\mu$  representa a viscosidade do fluido.

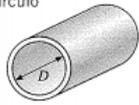
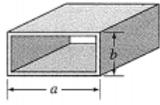
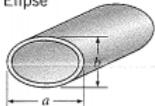
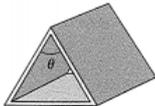
$$Re = \frac{V.l}{\mu} \quad (3.5)$$

Por outro lado, Incropera (2008, p.236.), “o número de Prandtl fornece uma medida da efetividade relativa dos transportes, por difusão, de momento e de energia no interior das camadas-limite de velocidade e térmica”.

Para a definição do número de Nusselt no interior do tubo, para um escoamento laminar, a tabela abaixo relaciona esse valor adimensional de acordo com algumas geometrias comuns.

Figura 13 - Número de Nusselt

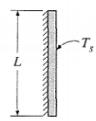
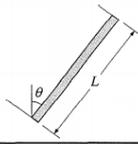
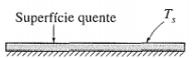
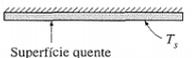
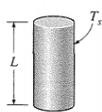
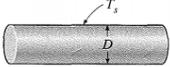
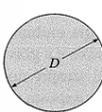
Número de Nusselt e fator de atrito para escoamento laminar completamente desenvolvido em tubos de diferentes seções transversais ( $D_h = 4A_c/\rho$ ,  $Re = V_{méd}D_h/\nu$  e  $Nu = h D_h/k$ )

Geometria do tubo	$a/b$ ou $\theta^\circ$	Número de Nusselt		Fator de atrito $f$
		$T_s = \text{Const.}$	$\dot{q}_s = \text{Const.}$	
Círculo 	—	3,66	4,36	64,00/Re
Retângulo 	$a/b$ 1 2 3 4 6 8 $\infty$	2,98 3,39 3,96 4,44 5,14 5,60 7,54	3,61 4,12 4,79 5,33 6,05 6,49 8,24	56,92/Re 62,20/Re 68,36/Re 72,92/Re 78,80/Re 82,32/Re 96,00/Re
Elipse 	$a/b$ 1 2 4 8 16	3,66 3,74 3,79 3,72 3,65	4,36 4,56 4,88 5,09 5,18	64,00/Re 67,28/Re 72,96/Re 76,60/Re 78,16/Re
Triângulo isósceles 	$\theta$ 10° 30° 60° 90° 120°	1,61 2,26 2,47 2,34 2,00	2,45 2,91 3,11 2,98 2,68	50,80/Re 52,28/Re 53,32/Re 52,60/Re 50,96/Re

Fonte: Çengel (2009, p. 469)

Para escoamentos externos, o coeficiente de transferência de calor por convecção natural, pode ser obtido pelo número adimensional de Nusselt médio que pode ser estimado de acordo com as geometrias apresentadas na tabela abaixo:

Figura 14 - Correlações empírica para o número de Nusselt

Geometria	Comprimento característico $L_c$	Faixa de Ra	Nu
Placa vertical 	$L$	$10^4-10^9$ $10^{10}-10^{13}$ Toda a faixa	$Nu = 0,59Ra^{1/4}$ (9-19) $Nu = 0,1Ra^{1/3}$ (9-20) $Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{1/4}} \right\}^2$ (9-21) (complexa, mas mais precisa)
Placa inclinada 	$L$		Use as equações da placa vertical para a superfície superior de uma placa fria e a superfície inferior de uma placa quente Substituir $g$ por $g \cos\theta$ para $Ra < 10^9$
Placa horizontal (Área da superfície $A$ e perímetro $p$ ) (a) Superfície superior de uma placa quente (ou superfície inferior de uma placa fria)  (b) Superfície inferior de uma placa quente (ou superfície superior de uma placa fria) 	$A_s/p$	$10^4-10^7$ $10^7-10^{11}$ $10^5-10^{11}$	$Nu = 0,54Ra^{1/4}$ (9-22) $Nu = 0,15Ra^{1/3}$ (9-23) $Nu = 0,27Ra^{1/4}$ (9-24)
Cilindro vertical 	$L$		Um cilindro vertical pode ser tratado como uma placa vertical quando $D \geq \frac{35L}{Gr^{1/4}}$
Cilindro horizontal 	$D$	$Ra_D \leq 10^{12}$	$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{1/4}} \right\}^2$ (9-25)
Esfera 	$D$	$Ra_D \leq 10^{11}$ $(Pr \geq 0,7)$	$Nu = 2 + \frac{0,589Ra_D^{1/4}}{[1 + (0,469/Pr)^{9/16}]^{1/4}}$ (9-26)

Fonte: Çengel (2009, p. 511)

### 3.3.4 Coeficientes de transferências de calor para radiação

O que nos permite calcular a energia trocada por um corpo com um sistema está exibida pela equação 3.6, Çengel (2009, p. 134). Para que as resistências térmicas definidas nos tópicos 3.3.2, tenham as mesmas dimensões físicas para que seja definida a resistência equivalente do sistema, se faz necessário definirmos o coeficiente de transferência de calor para radiação, que consiste na equação definida abaixo:

$$Q_{rad} = A * \alpha * \varepsilon * (T_q^4 - T_{amb}^4) \quad (3.6)$$

$$h_{\text{Radiação}} = \alpha * \varepsilon * (T_q^2 + T_{\text{amb}}^2) * (T_q - T_{\text{amb}}) \quad (3.7)$$

No qual:

$\alpha$  = Constante de Stefan-Boltzmann.

$A$  = Área da superfície sólida

$\varepsilon$  = Emissividade

$T_{\text{amb}}$  = Temperatura média

$T_q$  = Temperatura da superfície

### 3.3.5 Primeira lei da termodinâmica

Para sistemas de volume de controle em regime permanente, a primeira lei da termodinâmica relaciona os fluxos de energia que atravessa determinados pontos do corpo em análise. Segundo Çengel (2009, p. 95) esta lei afirma que em um processo a energia não pode ser criada ou destruída, apenas pode mudar de forma. A equação que menciona a variação da energia interna do sistema, segundo Borgnakke e Sonntag (2013, p. 174), está representada logo abaixo.

$$\frac{dE_{v,c}}{dt} = \dot{Q}_{v,c} - \dot{W}_{v,c} + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) - \sum \dot{m}_s \left( h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) \quad (3.8)$$

## 3.4 Concentrador parabólico composto

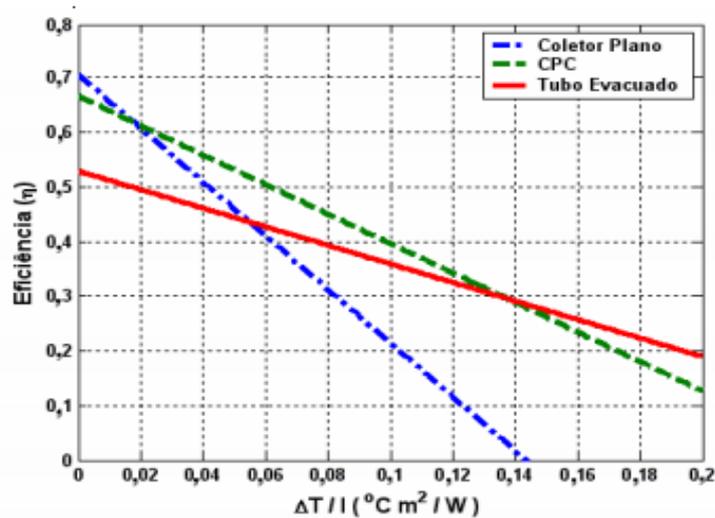
O movimento que o sol realiza de acordo com a época do ano, que já foi abordado anteriormente, expõe uma grande parte das tecnologias que utilizam a captação da energia solar, à movimentação de sua geometria com o passar das horas, de uma forma em que sua eficácia depende diretamente do rastreamento do sol, como acontece com os concentradores solar parabólico. A utilização da metodologia de não-imagem, como aborda O’Gallagher (2008, p. 1), tornou possível para determinadas faixas de concentração, a possibilidade de coletores

solares totalmente estacionários, sendo possível concentrações ainda maiores para quando adotado o rastreamento solar durante o decorrer do ano.

Fazendo um comparativo da figura abaixo que mostra retas de eficiência de algumas configurações de coletores e concentradores solar, para a razão da variação de temperatura pela irradiação solar incidente, percebemos que para determinada faixa de 0,02 a aproximadamente 0,14  $^{\circ}\text{Cm}^2/\text{w}$ , os concentradores parabólicos composto, possuem uma atratividade superior aos dois outros modelos de absorvedores do potencial energético solar.

Para a Lei de reflexão dos raios, segundo Tapia (2008), se uma superfície plana refletora está exposta a um mesmo meio, e um raio de luz incide sob um ponto na superfície, o ângulo formado pelo raio e por uma reta normal a superfície, será igual ao ângulo de reflexão da luz, desde que a reta normal e o raio de luz estejam contidos no mesmo plano. Com isso, temos que um raio que incide dentro do angulo de aceitação de um CPC, esse será refletido com o mesmo ângulo formado por uma reta normal a superfície da parábola, como já descrito.

Figura 15 - Gráficos das eficiências de coletores planos, CPC de baixa relação de concentração e coletor de tubos evacuados.

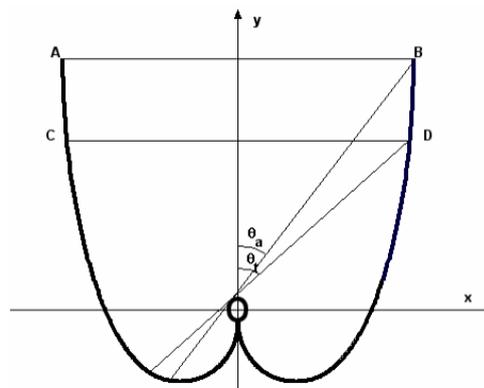


Fonte: BRANDÃO, 2004, p.11.

Segundo O'Gallagher (2008), o ângulo de aceitação definido por  $\theta_c$  (ver figura 16), tem por propósito direcionar raios que atravessem a área de aceitação com valores de inclinação menor do que  $\theta_c$ , direcionando-os para a superfície absorvedora. Para ângulos superiores aos de aceitação, a geometria do concentrador faz com que essa radiação seja retornada para o ambiente externo, assim não contribuindo para troca de energia com o tubo absorvedor.

Uma das desvantagens do concentrador do tipo CPC consiste no alto custo com material, ocasionado pelo perímetro das parábolas, uma das formas encontrada por Rabl (1976) foi diminuir a geometria em seções, que é denominado de truncamento, ocasionando uma pequena perda do ângulo de aceitação, porém possuindo alta atratividade pela economia de recursos (ver figura 15), onde a seção CD representa as seções de um coletor truncado, e as seções AB representa um CPC totalmente desenvolvido.

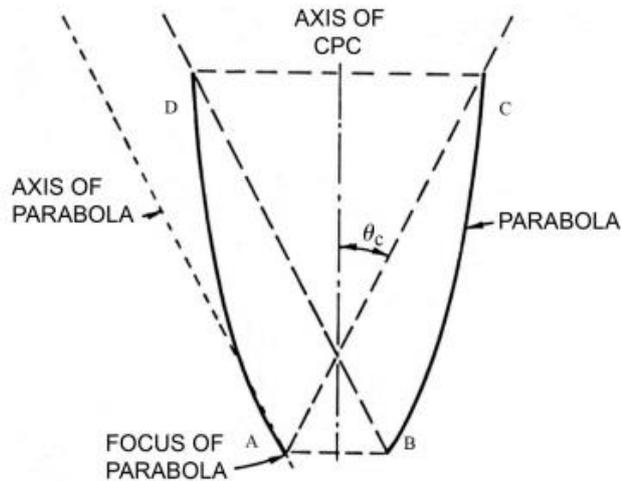
Figura 16 - Seções truncadas de um CPC



Fonte: BRANDÃO, 2004.

O’Gallagher (2008) afirma que para o projeto da geometria da calha parabólico composta, se faz necessário possuir informação de duas variáveis geométricas, sendo todos os outros parâmetros definidos em função dessas duas variáveis. Geralmente essas informações conhecidas consistem no ângulo de aceitação  $\theta_c$  e a largura dos pontos AB mostrado na figura abaixo.

Figura 17 - Partes geométricas de um CPC.



Fonte: O’Gallagher, (2008).

A nossa atenção a partir desse momento se resumirá em descrever geometricamente todos os fatores da calha do CPC. Para uma calha simples e não truncada podemos descrever a área de abertura CD, representada na figura, através da equação W, a seguir, assim como a altura da calha que é representada por H, também estará exibida.

$$W = S / \text{sen } \theta_c \quad (3.9)$$

$$H = S(1 + 1/\text{sen } \theta_c) / (2 \tan \theta_c) \quad (3.10)$$

Segundo Bráulio Bezerra (2004), apud Welford, Winston 1976, Rabl 1978, a relação de concentração nominal máxima permitida para um CPC é relacionada pela seguinte equação fundamentada pela segunda lei da termodinâmica.

$$C_n = \frac{1}{\text{sen} \theta_c} \quad (3.11)$$

Uma das relações mais importante no dimensionamento de um CPC, é a relação de concentração, que é representada pela razão entre a área de abertura e a área externa da superfície absorvedora. Como a área de abertura para um CPC em duas dimensões é representada pela largura máxima da calha coletora multiplicada pelo o seu comprimento, e a área da superfície absorvedora corresponde ao perímetro do tubo, multiplicado pelo seu

comprimento, que muitas vezes é igual ao da superfície coletora, essa razão se simplifica, tornando a razão entre a largura de abertura pelo perímetro do tubo.

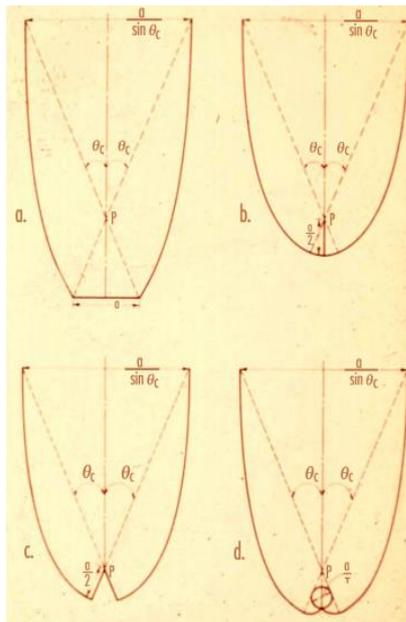
$$C_{geométrico} = A_{abertura}/A_{concentrador} \quad (3.12)$$

Como o ângulo de aceitação está diretamente relacionado com a quantidade de raios que é direcionado para o tubo absorvedor, como já tratado acima, percebemos que esse ângulo decresce, com o aumento da relação de concentração, o que explica a necessidade do rastreamento solar para altas concentrações.

As narrativas a seguir, para as definições da geometria que rege um concentrador solar parabólico composto, serão fundamentadas através do livro *Nonimaging Optics in Solar Energy* (Óptica sem imagem em energia solar), produzida por Joseph J. O’Gallagher (2008).

Existem diferentes geometrias para os tubos absorvedores com aplicações nos CPCs, como mostra a figura abaixo, para o presente momento, nossa atenção será exclusivamente voltada para os concentradores do tipo d, em que a seção transversal do tubo absorvedor é circular.

Figura 18 - tipos de CPC e de tubos absorvedores: a) Tubo plano horizontal, b) tubo plano vertical, c) tubo em v invertido e d) tubo circular.



Fonte: O’Gallagher, (2008).

Para essa configuração, a calha não é descrita fielmente por uma parábola, pois os raios que incidem sobre o coletor não são direcionados para um ponto fixo do tubo absorvedor, sendo estes direcionados para pontos tangenciais à superfície externa do tubo circular.

Tomando o sistema de coordenadas no centro do tubo, se faz mais atrativo descrever a geometria da calha parabólica em termos das variáveis  $\rho$  e  $\theta$ , como mostra a figura abaixo. podemos descrever  $\rho$  como o comprimento de um ponto tangente do tubo absorvedor com uma angulação  $\theta$ , à calha parabólica, onde esse ângulo se inicia no eixo do quarto quadrante, como mostrado na figura abaixo. Para o ângulo  $\theta$  que está contido dentro do intervalo  $\theta < \theta_c + \pi/2$ .  $\rho = \theta * a$

Para o ângulo definido por  $\theta > \theta_c + \pi/2$ , temos a seguinte equação (O’Gallagher, 2008, apud Rabl, 1976):

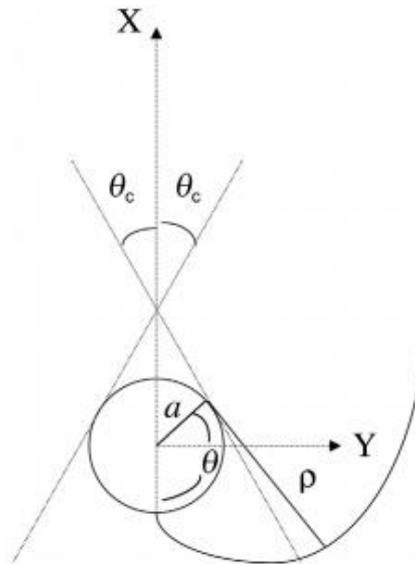
$$\rho = a(\theta + \theta_c + \pi/2 - \cos(\theta - \theta_c)/(1 + \sin(\theta - \theta_c)) \quad (3.13)$$

Para as coordenadas x e y de um CPC não truncado, temos as seguintes equações:

$$x = a \cdot \sin\theta - \rho \cos\theta \quad (3.14)$$

$$y = -a \cos\theta - \rho \sin\theta \quad (3.15)$$

Figura 19 - Voluta de um CPC de tubo circular.



Fonte: O’Gallagher, (2008).

Para um concentrador CPC a eficiência térmica do equipamento consiste em:

$$\eta = e_{\text{útil}} / e_{\text{recebida}} \quad (3.16)$$

Onde,  $e_{\text{útil}}$  consiste na energia útil entregue pelo equipamento para transformar o fluido térmico em vapor, e  $e_{\text{recebida}}$  consiste na energia fornecida pela radiação solar recebida pela área de abertura da calha, que consiste em:

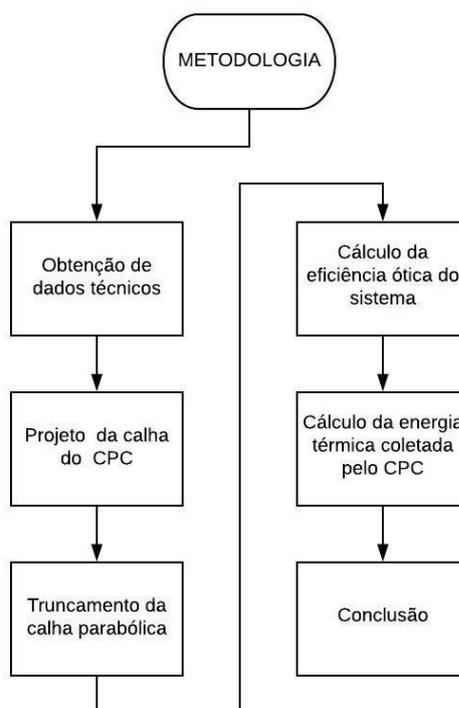
$$e_{\text{recebida}} = I \cdot A \quad (3.17)$$

O motivo que faz com que exista uma diferença da energia fornecida da energia útil, consiste nas perdas geométricas, que são provocadas pelas irregularidades da superfície do absorvedor, assim como a existência da absorvidade do material da calha parabólica que faz com que uma pequena parcela da radiação recebida aqueça o material e uma outra parcela maior seja refletida para o tubo absorvedor, este também não consegue absorver 100 % da radiação fornecida, refletindo uma pequena parcela para o ambiente externo. Existe as perdas térmicas, em que o tubo absorvedor está a uma temperatura mais elevada que o ambiente externo, provocando uma perda de calor, mesmo na existência de tubos de vidros evacuados.

## 4 METODOLOGIA

As etapas para a realização do estudo serão exibidas no fluxograma abaixo, que será descrito a seguir:

Figura 20 - Fluxograma da metodologia utilizada.



Fonte: própria autoria.

### 4.1 Obtenção de dados técnicos

O levantamento de dados técnicos foi realizado fazendo pesquisas via fontes confiáveis de dados (sites de internet, revistas, artigos científicos, livros, monografias ou dissertações), para obter respostas do tipo: temperatura média de acordo com o mês do ano, e dados a respeito da irradiação solar na região de estudo.

### 4.2 Projeto da calha do CPC

Para o projeto da calha foi utilizado os dados fornecidos pela pesquisa que foi citada acima. Em foi empregado de conhecimento, técnico científico da ótica de não-imagem para a

obtenção das características geométricas, junto às funções que expressam as curvas, que serão utilizadas para o modelamento em softwares tipo CAD para a obtenção dos desenhos em duas dimensões da calha parabólica.

O projeto da calha parabólica, devem atender alguns requisitos, que são eles:

1. A geometria necessita ser estática durante o dia (não rastrear o sol durante o dia).
2. Levar em consideração o melhor custo benefício, buscando a economia de material.
3. Fornecer a maior quantidade de energia possível para obtenção do maior volume de água destilada.

Para atender ao requisito 1, fazemos uso do maior ângulos de aceitação (ver tabela 4), que consiga absorver energia sem a necessidade de correções da posição do concentrador ao decorrer do dia, sendo essa posição atualizada ao decorrer de dias, semanas ou meses, a depender da relação de concentração, onde para baixas concentrações ( $C_n \leq 2$ ), o CPC é totalmente estático, e para concentrações menores a 10, as correções são realizadas poucas vezes ao ano.

Tabela 2 - Relação de concentração e ângulo de aceitação

RELAÇÃO DE CONCENTRAÇÃO	ÂNGULO DE ACEITAÇÃO (radianos)	ÂNGULO DE ACEITAÇÃO (GRAUS)
1,5	0,73	41,8
2	0,52	30,0
2,5	0,41	23,6
3	0,34	19,5
4	0,25	14,5
5	0,20	11,5
6	0,17	9,6
7	0,14	8,2
8	0,13	7,2
9	0,11	6,4
10	0,10	5,7

Fonte: Própria autoria.

#### 4.3 Truncamento da calha parabólica

Para CPC de tubo circular (O’Gallagher, 2008, apud Rabl, 1976), as equações que plotam a geometria das parábolas são descritas a seguir.

$$x = a \cdot \text{sen}\theta - \rho \cos\theta \quad (4.1)$$

$$y = -a \cos\theta - \rho \text{sen}\theta \quad (4.2)$$

Em que  $a$  representa o raio do tubo absorvedor,  $\rho$  equivale ao raio do tubo multiplicado pelo teta, e o teta varia entre  $\theta_c + \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_c$ .

Para o seccionamento das seções para estudo do truncamento, iremos variar o valor final de teta sob uma taxa pré-determinada ( $\theta_{taxa}$ ), e com a ferramenta de medições do *software* CAD, iremos calcular as variáveis importantes de projeto, como a redução do comprimento da calha e o fator de concentração. Com isso o  $\theta$  definido anteriormente vai se comportar da seguinte forma:

$$\left(\theta_c + \frac{\pi}{2}\right) \leq \theta \leq \left(\frac{3\pi}{2} - \theta_c - \theta_{taxa}\right) \quad (4.3)$$

#### 4.4 Eficiência ótica do sistema

Para a eficiência ótica do sistema, segundo Rabl (1976, Apud Brandão, 2004), para refletividades superiores a 0,75, podemos aproximar à eficiência ótica do CPC através da seguinte equação.

$$\eta_0 = \rho_r^{<n>} \quad (4.4)$$

$\eta_0$  = Eficiência ótica do sistema.

$< n >$  = Número médio de reflexões

$\rho_r$  = Refletividade da calha parabólica

#### 4.5 Cálculo da energia térmica coletada pelo CPC

Para esse cálculo será levantado os valores da radiação solar incidente sobre a cidade de Caruaru-PE, e será levado em consideração as perdas óticas e térmicas por irradiação, já que as perdas por convecção serão desprezadas por uso do vácuo na geometria. Também será levantado valores em função do dia do mês, mensal e anual, para a energia térmica absorvida pelo tubo absorvedor.

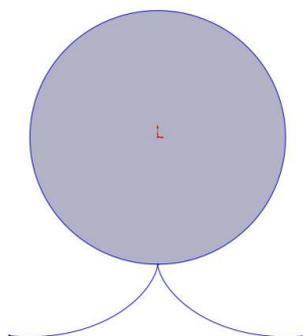
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o modelo do concentrador selecionado, foi utilizado um fator de concentração igual a 10, para que fosse absorvida uma quantidade de energia atrativa para evaporar a água, e que esse concentrador fosse estático durante o dia (não necessitando rastrear o sol). Para o tubo absorvedor foi utilizado na análise um tubo circular de cobre de  $\frac{5}{8}$ " (15,875mm) de diâmetro, com uma espessura de parede de 1mm por 1 metro de comprimento.

Para a superfície refletora foi adotado o aço inoxidável 316L como material para uma parede de  $\frac{1}{8}$ " (3,17mm). Para a geometria da voluta, como foi utilizado um fator de concentração igual a 10, o ângulo foi obtido para  $0 \leq \theta \leq 1,670$ .

A figura a seguir mostra uma vista em duas dimensões da voluta obtida para o CPC em desenvolvimento.

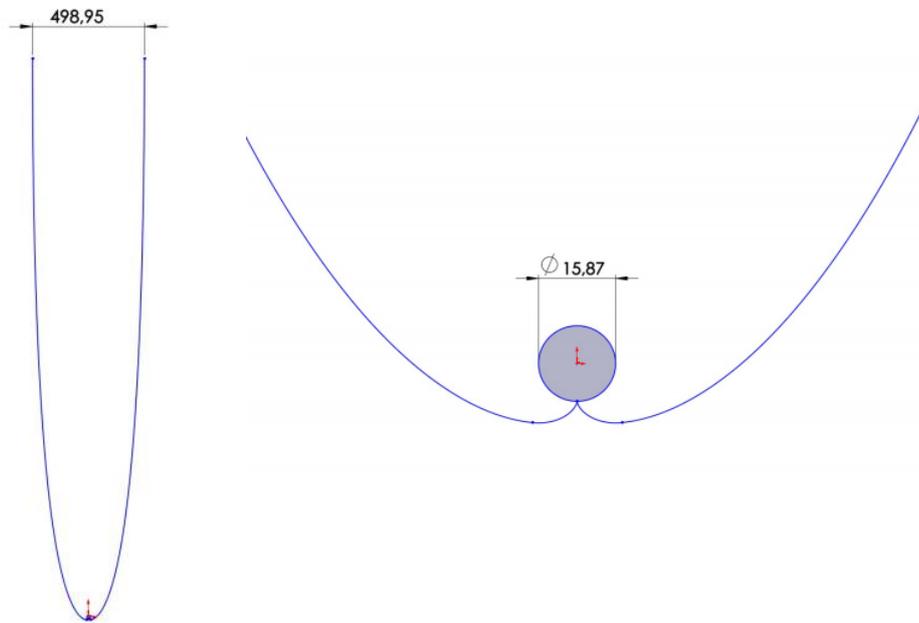
Figura 21 - Voluta de um CPC com relação de concentração igual a 10.



Fonte: Própria autoria.

Para as parábolas que descrevam o CPC completo, temos que  $1,670 \leq \theta \leq 4,61$ . As figuras a seguir mostram uma parte da geometria, exibindo o tubo absorvedor, junto a voluta e um trecho de parábola, e a figura a seguir traz a geometria completamente desenvolvida para uma concentração de 10.

Figura 22 - CPC completamente desenvolvido: a) geometria completa e b) Fragmento de



parábola e voluta

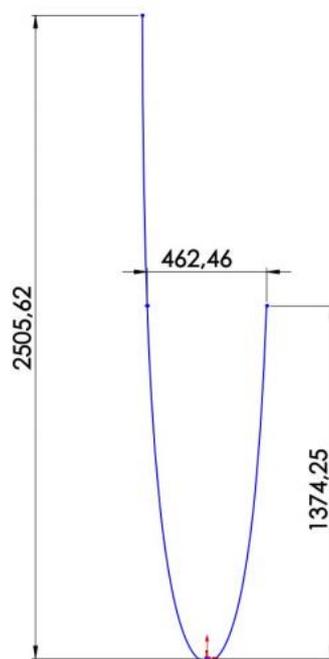
a) geometria completa e b) Fragmento de parábola e voluta.

Fonte: Própria autoria.

## 5.1 Truncamento

Para o seccionamento das seções, foi utilizada uma redução de 0,01 radianos. A figura abaixo mostra os efeitos e as medições para uma redução de 4,61 rad para 4,54 rad. Para o lado esquerdo da imagem, temos a parábola completamente desenvolvida e para o lado direito temos a parábola truncada.

Figura 23: Geometria do CPC completo e truncado.



Fonte: Própria autoria.

A tabela abaixo mostra os dados obtidos pelas reduções sucessivas de acordo com as medições realizadas no Cad.

Tabela 3 - Truncamento do CPC.

Variação (Rad)	Comprimento (mm)	Redução percentual	Abertura atual (mm)	Concentração geométrica	Redução concentração geométrica
4,60	2273,60	9%	497,27	9,97	0,35%
4,59	2072,15	17%	493,79	9,90	1,04%
4,58	1896,0	24%	488,98	9,80	2,01%
4,57	1741,18	31%	483,21	9,68	3,16%
4,56	1604,31	36%	476,73	9,55	4,46%
4,55	1482,73	41%	469,77	9,41	5,86%
4,54	1374,25	45%	462,46	9,27	7,32%
4,53	1277,04	49%	454,46	9,11	8,93%
4,52	1189,60	53%	447,31	8,96	10,36%
4,51	1110,65	56%	439,62	8,81	11,90%

4,50	1039,14	59%	431,94	8,66	13,44%
------	---------	-----	--------	------	--------

Fonte: própria autoria.

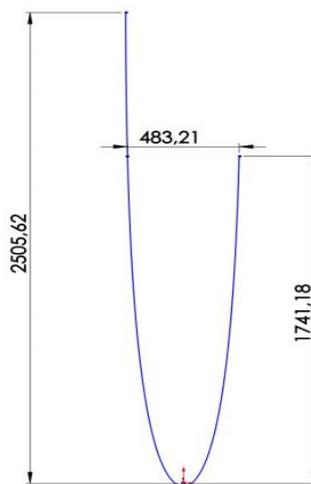
O valor de truncamento escolhido foi para uma redução de 0,04 rad, onde a tabela abaixo mostra as características do truncamento, e a figura logo em seguida traz um comparativo entre o CPC completamente desenvolvido e o truncado (lado esquerdo CPC completamente desenvolvido e lado direito geométrica truncada).

Tabela 4 – Configuração adotada de truncamento

Variação	Comprimento	Redução percentual	Abertura atual	Concentração geométrica	Redução concentração geométrica
4,57	1741,18 mm	31%	483,21mm	9,68	3,16%

Fonte: própria autoria.

Figura 24 - Geometria truncada escolhida.



Fonte: própria autoria.

## 5.2 Eficiência Ótica

A tabela a seguir mostra a eficiência ótica do CPC de acordo com as propriedades físicas definidas.

Tabela 5 - Características óticas do sistema.

Propriedades	Valor	Fonte
--------------	-------	-------

Refletividade	0,86	Brandão 2004.
Número médio de reflexões	1,153	Interpolado de Rabl 1976
Absortância do tubo	0,95	Brandão 2004.
Perdas de Lacunas	0,02	O´Gallagher 2008.
Fração da Radiação solar perdida	0,98	O´Gallagher 2008.
Eficiência ótica( $\eta_0$ )	0,84	Própria autoria

Fonte: própria autoria.

### 5.3 Temperatura ambiente média

Os valores utilizados para o cálculo da eficiência térmica foram tirados do trabalho de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental dos autores Medeiros et al (2017), os mesmos realizaram estudo climatológico do município de Caruaru – PE. Representamos na tabela abaixo:

Tabela 6 - Temperatura média ambiente em função do mês.

Meses	T (°C)
Jan	23,9
Fev	24,1
Mar	24,1
Abr	23,6
Mai	22,7
Jun	21,6
Jul	20,6
Ago	20,9
Set	21,7
Out	23,1
Nov	24,7
Dez	24,2
Anual	22,5

Fonte: Medeiros, R.M.; Holanda, R.M.; Silva, V.P. (2017)

### 5.4 Radiação Solar

Os dados para o cálculo da radiação solar foram retirados do Atlas Solar Global, de acordo com as características de localização de Caruaru. Os valores da radiação solar direta estão mostrados através do gráfico e da tabela abaixo.

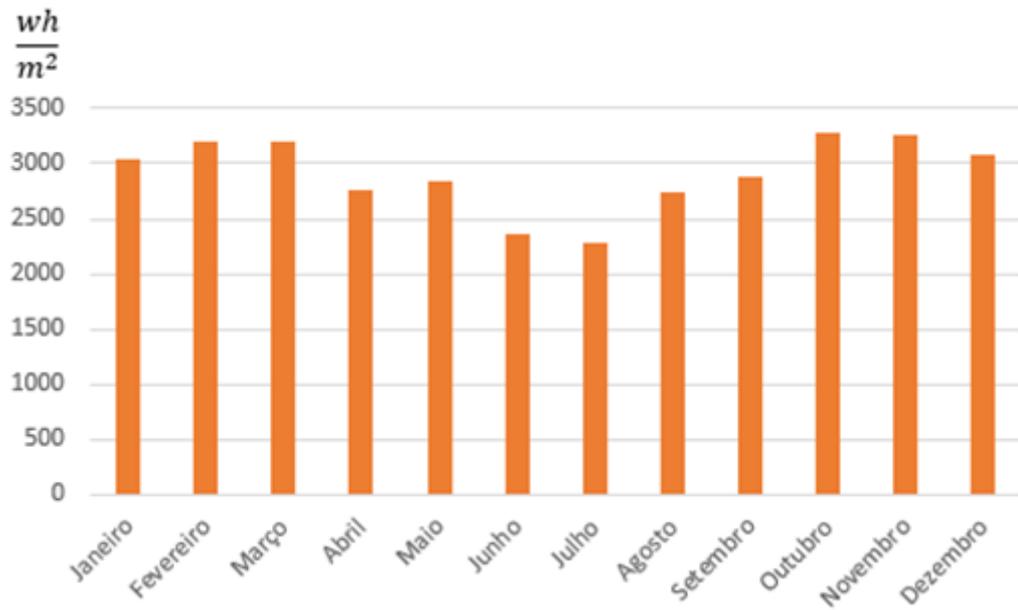
Tabela 7 - Fluxo de Radiação solar em função da hora e do mês.

Mês	$\frac{wh}{m^2}$							
	8:00 às 9:00	9:00 às 10:00	10:00 às 11:00	11:00 às 12:00	12:00 às 13:00	13:00 às 14:00	15:00 às 16:00	Total Por dia
	Janeiro	342	446	481	483	477	430	
Fevereiro	376	498	551	512	464	419	382	3202
Março	363	483	504	523	488	447	386	3194
Abril	350	448	508	508	469	418	377	2763
Mai	308	398	453	463	434	407	380	2843
Junho	244	304	360	378	372	358	347	2363
Julho	224	288	350	380	363	344	332	2281
Agosto	261	344	409	444	435	431	425	2749
Setembro	286	359	427	463	476	498	375	2884
Outubro	376	479	506	498	483	482	455	3279
Novembro	288	394	491	526	549	529	489	3266
Dezembro	350	440	462	500	494	442	388	3076
Média diária	2911,75 (10,482 Mj/m <sup>2</sup> )							

Fonte: Dados retirados do Global Solar Atlas, acessado em 1 de novembro de 2020.

Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/map?c=11.953349,9.84375,3>

Gráfico 1: Gráfico da irradiação solar em função do dia do mês.

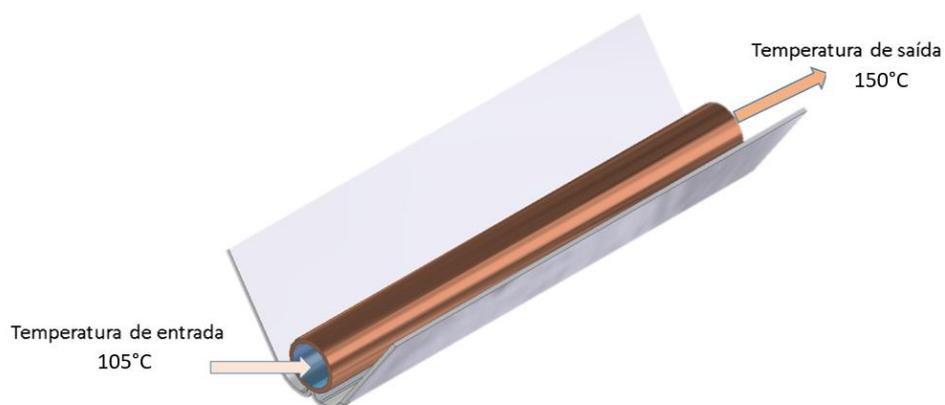


Fonte: Própria autoria.

### 5.5 Temperatura do fluido de trabalho

As Temperaturas de entrada e de saída do fluido térmico de condução de calor, está representado pela figura abaixo, onde o fluido entra no tubo absorvedor com uma temperatura média de 105°C e deixa o trocador de calor com uma temperatura de 150°C.

Figura 25 - Representação da temperatura do fluido ativo no CPC.



Fonte: Própria autoria

## 5.6 Fluido térmico utilizado para análise

A tabela a seguir mostra as propriedades termo físicas para o fluido térmico utilizado no projeto. Em sequência é exibido um gráfico equivalente para a condutividade térmica em função da temperatura de trabalho. O óleo mineral utilizado é o Oliterm 20, da marca Olipes.

Tabela 8 – Propriedades físicas do óleo térmico mineral.

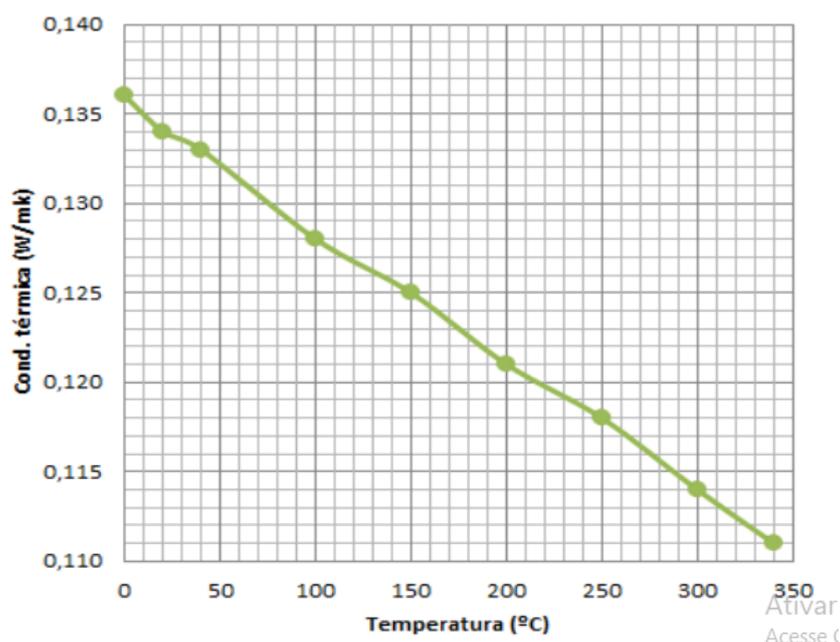
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS	NORMA	VALOR
Viscosidade a 40 °C (cSt)	ASTM D-445	28 - 38
Índice de viscosidade, Típico	ASTM D-2270	100
Densidade a 15 °C, Típico (kg/l)	ASTM D-1298	0,860 - 0,880
Ponto de congelação (°C)	ASTM D-97	< -15
Ponto de inflamação COC (°C)	ASTM D-92	> 200
Corrosão ao cobre, 3h, 100 °C, (Grau)	ASTM D-130	1ª
Número de neutralização (mg KOH/g)	ASTM D-664	< 0,05
Temperatura de autoinflamação (°C)	DIN 51794	> 360
Resíduo Micro - Conradson (% em peso)	ASTM D-4530	< 0,06

Fonte: OLIPES.

Disponível em: <https://www.olipes.com/eu/pt/termicos/84-oliterm-20-84360447.41319.html>

Acesso em: 04 nov. 2021

Figura 26 - Condutividade térmica em função da temperatura do óleo mineral



Fonte: OLIPES.

Disponível em: <https://www.olipes.com/eu/pt/termicos/84-oliterm-20-8436044741319.html>. Acesso em: 04 nov. 2021

## 5.7 Perdas térmicas

As perdas térmicas sofridas pelo sistema serão exibidas a seguir. As características térmicas do sistema estão representadas na tabela abaixo.

Tabela 9 - Perdas térmicas sofridas pelo sistema

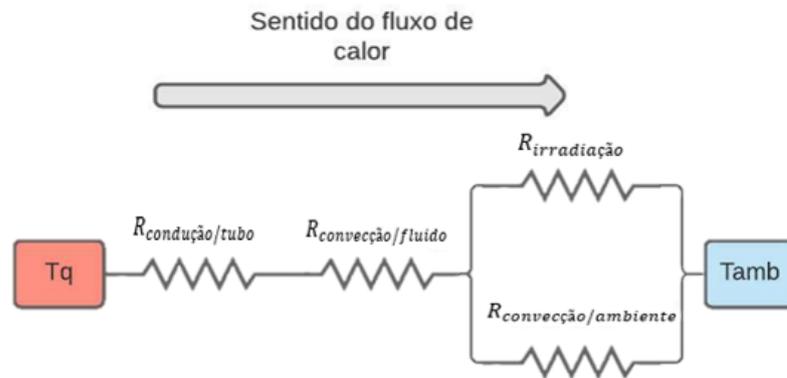
Variáveis	Valores	Fonte
Temperatura média da superfície do tubo	127,5°C	Retirada da tabela 8
Temperatura média do ambiente	23,35°C	Retirada da tabela 8
Emissividade tubo de cobre polido a 300° C	0,03	Incropera, Frank. P. (2008)
Área do tubo absorvedor	0,0436m <sup>2</sup>	Calculado pelo autor

Fonte: Própria autoria

### 5.7.1 Fluxo de calor perdido para o ambiente

O fluxo de calor ao qual está exposto o sistema, está representado pela figura abaixo. O sistema consiste em resistências em série e paralelo. Onde  $T_q$  representa a temperatura do fluido térmico. Seguido da resistência provocada pela convecção no interior do tubo.  $T_1$  representa a temperatura superficial da parede interna do tubo. Seguido da resistência de condução ocasionada pela parede da tubulação de cobre.  $T_s$  representa a temperatura da superfície externa do tubo absorvedor. Seguido pelas resistências em paralelo ocasionada pela irradiação e pela convecção externa ocasionada pelo ambiente. E por fim,  $T_{amb}$  representa a temperatura do ambiente externo.

Figura 27 - Sentido do fluxo de calor



Fonte: Própria autoria

Para a resistência de convecção do tubo, para um escoamento laminar, temos que o número de Nusselt, de acordo com o Çengel (2009, p. 482), vale 4,36. Para as demais propriedades para definição da resistência térmica de convecção estão representados abaixo.

Tabela 10 - Propriedades para definição da resistência térmica de convecção interna do tubo

Variável	Valores	Fonte
Nusselt	4,36	Çengel (2009, p. 482)
Condutividade térmica	0,128W/m.K	OLIPES. Disponível em: <a href="https://www.olipes.com/eu/pt/termicos/84-oliterm-20-8436044741319.html">https://www.olipes.com/eu/pt/termicos/84-oliterm-20-8436044741319.html</a> .
Diâmetro do tubo	0,01387m	Própria autoria
Coeficiente de transferência de convecção	40,23 W/m <sup>2</sup> .K	Própria autoria
Resistência térmica	0,570 K/W	Própria autoria

Fonte: Própria autoria

Para a resistência de condução, a tabela abaixo mostra as características físicas do sistema, assim como o valor da resistência térmica.

Tabela 11 - Características físicas do sistema

Variável	Valores	Fonte
Raio externo do tubo	7,937 mm	-
Raio interno do tubo	6,937 mm	-
Comprimento do tubo	1000 mm	-
Condutividade térmica do cobre comercial	401 W/m.K	Borgnakke, Claus (2013)
Resistencia térmica de condução	$5,34 \times 10^{-5}$ K/W	Calculado pelo autor

Fonte: Própria autoria

Como estamos interessados apenas no fluxo de calor, ou seja, nas perdas térmicas sofridas pelo sistema, as únicas temperaturas requeridas para os cálculos são a temperatura do fluido térmico ( $T_q$ ) e a temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ).

Para a resistência térmica de irradiação temos os seguintes dados exibidos na tabela abaixo:

Tabela 12 - Resistência térmica de irradiação

Propriedade	Valores	Fonte
Emissividade do cobre	0,03	Incropera, Frank. P. (2008)
Coefficiente de transferência de irradiação	$1,27 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$	Calculado pelo autor

Fonte: Própria autoria

Para a resistência térmica de convecção no ambiente externo, temos os seguintes dados exibidos na tabela abaixo:

Tabela 13 - Resistência térmica de convecção do ambiente externo

Variável	Valores	Fonte
Número de Prandtl (1 atm – 296,5K)	1,33	Çengel (2009, p. 877)
Condutividade térmica do ar (1 atm – 296,5K)	0,02520W/m.K	Çengel (2009, p. 877)
Viscosidade cinética	$1,524 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	Çengel (2009, p. 877)

Número de Rayleigh	$5,048 \times 10^4$	Calculado pelo autor
Nusselt	6,54	Calculado pelo autor
Coeficiente de transferência de convecção	$33,99 \text{ w/m}^2 \cdot K$	Calculado pelo autor
Resistência equivalente em paralelo da radiação e convecção.	0,6746 K/W	Calculado pelo autor

Fonte: Própria autoria

Para o valor total da resistência equivalente do sistema, assim como o fluxo de calor, e a energia total perdida diária, estão apresentadas na tabela a seguir:

Tabela 14 - Energia perdida

<b>Propriedade</b>	<b>Valores</b>
Resistência total equivalente	1,16 K/W
Potência perdida	89,78 W
Energia perdida por dia	2,586 MJ

Fonte: Própria autoria

## 5.8 Energia térmica coletada pelo tubo Absorvedor

A energia útil, que equivale a diferença entre a energia total menos as perdas óticas e térmicas, está exibida na tabela abaixo.

Tabela 15 - Energia média coletada pelo CPC

<b>Energia média coletada pelo CPC (KJ/dia)</b>	
Energia total	5065,0
Energia perdida para o ambiente	2586,0
Energia perdida/fatores óticos	906,12
Energia rejeitada total	3492,12
Energia útil	1572,88
Eficiência térmica	0,310

Fonte: Própria autoria

### 5.9 Cálculo da média de água destilada diariamente

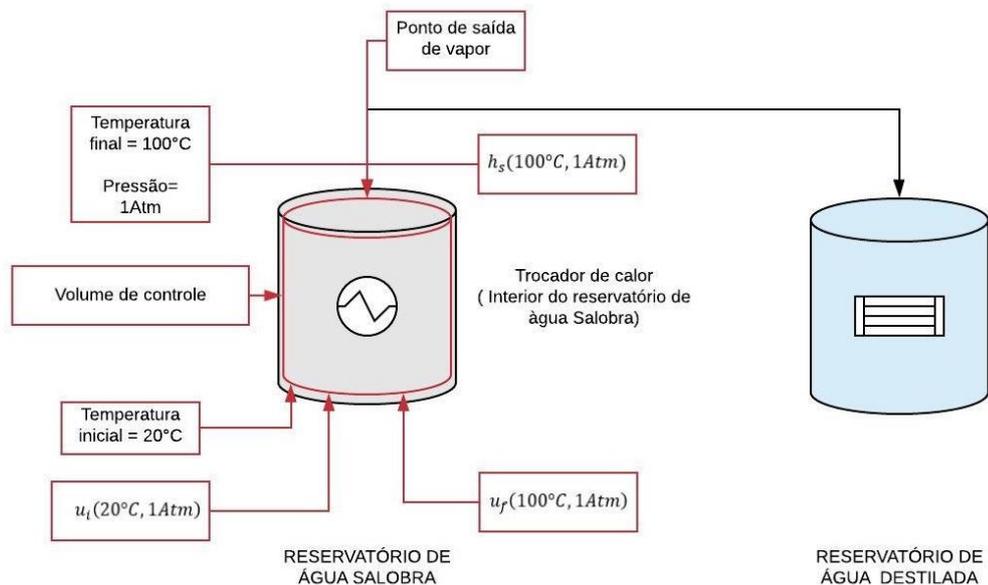
Aplicando a primeira lei da termodinâmica no reservatório de água salobra em estudo, e aplicando as seguintes simplificações ao problema:

Considerações para simplificações de cálculo:

- 1 - Regime transiente.
- 2 - Variação da energia cinética e potencial desprezíveis.
- 3 - Volume de controle estático.
- 4 - Propriedades termodinâmicas constantes.

Chegamos a seguinte equação, no qual as variáveis  $m_s$  representa a massa em kg de água destilada,  $m_e$  representa a massa de água salobra contida inicialmente no reservatório,  $Q$  representa a energia útil coletada pelo CPC,  $u_i$  representa a energia interna inicial do sistema,  $u_f$  representa a energia interna de saída do sistema e  $h_s$  representa o valor da entalpia que sai do reservatório.

Figura 28 - Simulação de troca de calor



Fonte: Própria autoria

$$m_s = \frac{Q + m_e(u_i - u_f)}{(h_s - u_f)} \quad (5.1)$$

Os valores para essas variáveis estão exibidos na tabela abaixo, assim como as fontes de onde foram retirados. A equação atualizada com a substituição das variáveis termodinâmicas está exibida logo abaixo.

Tabela 16 - Variáveis Termodinâmicas

Propriedade	Temperatura	Pressão	Valor	Fonte
Energia interna inicial ( $u_i$ )	20°C	1 atm	83,91 $\frac{KJ}{Kg}$	Çengel (2009)
Energia interna final ( $u_f$ )	100°C	1 atm	2506,0 $\frac{KJ}{Kg}$	Çengel (2009)
Entalpia de saída ( $h_s$ )	100°C	1 atm	2675,6 $\frac{KJ}{Kg}$	Çengel (2009)
Calor recebido (Q)	-	-	1782,87 KJ	Própria autoria

Fonte: própria autoria.

$$m_s = 9,27 - 14,298m_e \quad (5.2)$$

Com isso temos que para um volume inicial de 648 ml ( $m_e = 0,648 \text{ Kg}$ ) o volume de água evaporada é nulo ( $m_s = 0$ ), ou seja, toda a energia útil absorvida pelo CPC foi usada apenas para aquecer a água do reservatório de água salobra. Porém quando  $m_e = 0,605 \text{ kg}$  (605,96 ml) o valor de água dessalinizada é igual a esse volume, ou seja,  $m_s = m_e = 687,9 \text{ ml}$ , o que significa que a energia útil absorvida pelo CPC foi suficiente para elevar a água de 20 °C até 100°C e converter o seu estado para vapor. Com isso o volume de água que consegue o maior volume de fluido destilado consiste em 605 ml, no qual podemos enxergar isso através do gráfico abaixo.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Estudo de métodos de dessalinização da água, é uma área do conhecimento que muito contribui com atenuação das dificuldades encontradas pelas pessoas que estão expostas a ambientes com baixos índices pluviométricos e que possuem reservatórios de água salina ou salobra. A utilização de um CPC para aplicação em um dessalinizador térmico solar, pode contribuir fortemente com a grande variedade de equipamentos existentes, trazendo uma maior quantidade de possibilidades de aplicações, e sendo competitivo com configurações existentes, como no caso dos concentradores parabólicos que necessitam rastrear o sol.

O Presente trabalho também permitiu analisar o comportamento ótico e geométrico de um CPC, com um fator de concentração igual a 10, mostrando as características geométricas, sendo exibidas as volutas, e as parábolas que fazem parte de um concentrador parabólico solar composto, sendo essas plotadas a partir de um *software* CAD, no qual foram utilizadas as equações características para o concentrador com um tubo circular.

Também foi relatado o comportamento do truncamento de um CPC, onde através da função de plotar curvas paramétricas e das ferramentas de cotas do CAD, foi possível ver o comportamento da relação de concentração, comprimento, e concomitantemente, analisando as reduções dessas variáveis de acordo com o ângulo de desenvolvimento do CPC, sendo esse estudo crucial para a relação custo/benefício, sendo poupado material para uma futura construção desse concentrador.

Os dados obtidos para a energia térmica coletada pelo CPC, também foi de total importância para estudos de viabilidade em investimentos de tecnologias que utilizam o sol como fonte “geradora” de energia para o município de Caruaru, tendo este, como um bom atrativo de investimento nesse tipo de conversão, sendo mais um estudo para agregar informações a respeito do potencial ainda pouco usufruído pela sociedade Caruaruense.

Portanto, a pesquisa foi fundamental, não apenas para o crescimento pessoal e profissional do autor, que fez uso de conhecimentos obtidos no curso de engenharia mecânica (Termodinâmica, Transferência de Calor e massa, ciência e engenharia dos materiais, e modelamento de sólidos com uso de *softwares* CAD), exigindo concomitantemente a obtenção de conhecimento não presente na graduação, como no caso do estudo ótico do CPC, como também contribuiu para pesquisadores do tema, ao mesmo tempo que agrega conhecimento ao potencial solar existente na cidade de Caruaru- PE, tornando ainda mais presente a discussão de tecnologias para captação da energia solar para o agreste Pernambucano.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAILTON, J. L. S. **Dessalinizador solar com condensador acoplado para produção de água potável no semiárido brasileiro**. Tese (Pós-Graduação em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2017.

A. RABL, NB GOODMAN, R. WINSTON. **Considerações práticas de design para coletores solares CPC**. Energia solar, Vol. 22; Iss. 4, 1979.

ATKINS, P.W.; JONES, Loretta. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 5.ed. Bookman Companhia Ed., 2011.

BORGNACKE, CLAUS. **Fundamentos da termodinâmica** [livro eletrônico] / Claus Borgnakke, Richard E. Sonntag; coordenação e tradução de Roberto de Aguiar Peixoto. – São Paulo: Blucher, 2018.

BRANDÃO, Bráulio Bezerra. **Coletor concentrador parabólico composto (CPC) com absorvedor V invertido completamente iluminado**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

CARVALHO, Cássio Cardoso. **Fontes heliotérmicas: um estudo sobre o funcionamento e o potencial de implementação da tecnologia no Brasil**. 2016. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Industrial Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

CARVALHO, R. M. **Análise óptica e térmica de um coletor solar parabólico com tubo evacuado para aplicação em sistemas de refrigeração por absorção**. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2018.

CELLI, R. Modelos de dessalinização e sua eficiência: comparativo entre tecnologias. **Revista eletrônica dos Cursos de Engenharia**, Paraná, n.1, 2017. Gestão, Tecnologia e Inovação. Disponível em: <<http://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharias/pdf/n1/Artigo3-n1-Robson.pdf>>. Acesso em: 11 de jun. de 2020.

ÇENGEL, Yunus. A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. Tradução Luiz Felipe Mendes de Moura; revisão técnica Kamal A. R. Ismail. São Paulo, 3. ed, 2009.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **CONAMA**: Resolução Conama nº 357, 17 de mar. de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

DINIZ, F. B. Nordeste: Futuro promissor para energia solar. **Caderno Setorial ETENE**, [S.l.], 2016. Disponível em: <[https://www.bnb.gov.br/documents/80223/3365127/solar\\_31-2018-FINAL.pdf/2c59b789-02ee-9a5a-3d8c-e5b95a0e3cb7](https://www.bnb.gov.br/documents/80223/3365127/solar_31-2018-FINAL.pdf/2c59b789-02ee-9a5a-3d8c-e5b95a0e3cb7)>. Acesso em: 01 de jul. de 2020.

**EMBRAPA:** Agricultura Biossalina: Desafios e alternativas para o uso de águas salobras e salinas no semiárido Brasileiro. São Paulo, 2019. ISSN 1516-4691. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1113051/agricultura-biossalina-desafios-e-alternativas-para-o-uso-de-aguas-salobras-e-salinas-no-semiarido-brasileiro>>. Acesso em: 20 de jun. de 2020.

GLOBAL SOLAR ATLAS. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/map?c=11.953349,9.84375,3>. Acesso em 01 de nov. 2020.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. **Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 9ª. ed., Vol. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HSIEH, C.K. Thermal analysis of CPC collectors. **Solar Energy**, v.27, p. 19-29. 1981.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2010. [S.l], 2010. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 06 de jun. de 2020.

INCROPERA, F. P. (et al). **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Tradução e revisão técnica Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. Rio de Janeiro, 2008.

INMET. **Precipitação total anual válido para 2019**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=desvioChuvaAnual>>. Acesso em 07 de jun. de 2020.

JORDÃO, D. M.R. **Sistemas fotovoltaicos domiciliares de dessalinização de água para consumo humano: um estudo de sua viabilidade e configurações**. Tese (Pós-Graduação em Energia) – Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2013.

JOSEPH J. O’GALLAGHER. **Nonimaging Optics in Solar Energy**. University of Colorado, 2008.

JULIETA, L. C. S. **Desinfecção solar da água contaminada com cianobactérias usando colectores parabólicos compostos**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto (Portugal), 2010.

KALOGIROU, SOTERIS A. **Engenharia de energia solar: processos e sistemas** / Soteris A. Kalogirou. – 2. ed. – Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

MARINHO, F. J. L.; ROCHA, E. N.; SOUTO, E. A.; CRUZ, M. P.; TAVARES, A. C.; SANTOS, S. A.; MARCOVICZ, F. **Destilador solar destinado a fornecer água potável para as famílias de agricultores de base familiar**. Revista Brasileira de Agroecologia, 7(3): 53-60, 2012.)

MARINHO, F. J. L et al. **Dessalinizador solar associado a coletor de águas de chuvas para fornecer água potável**. SIMPÓSIO REGIONAL E DESENVOLVIMENTO

RURAL SUSTENTÁVEL. 1., 2015. Lagoa Seca, PB. **Simpósio...** Lagoa Seca: Universidade Estadual da Paraíba, 2015.

MEDEIROS, R.M.; HOLANDA, R.M.; SILVA, V.P. **Estudo climatológico do município de Caruaru – PE, Brasil.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017.

MENEZES, A.; ISHIKI, H. **Brasil frente à escassez de água.** Colloquium Humanarum. Presidente Prudente – SP, 2014. Disponível em: <<https://revistas.unoeste.br/index.php/ch/article/download/1206/1279/>>. Acesso em: 25 jun. 2020.

NASCIMENTO, A.S. FARIAS, E.F.S. MILER, T.S. MENDES, R.L.D. MESQUITA, M.S. Produção de alface em NFT e Floating aproveitando água salobra e o rejeito da dessalinização. **Revista Ciência Agrônômica**, Ceará, v. 42, n. 2, p. 319-326, 2011.

NOVAIS, A.P.P. MENDES, I.F. **Cercas e secas: reflexões sobre a água no Nordeste semi-árido.** Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Goiás – Campus Catalão, Goiás, 2012.

OLIPES, LUBRICANTES. **Olipes Catálogos.** Disponível em: <https://www.olipes.com/eu/pt/termicos/84-oliterm-20-8436044741319.html>. Acesso em: 04 nov. 2021

OLIVO, A. M.; ISHIKI, H. M. **Brasil frente à escassez de água.** Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE. Mestrado em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional, Presidente Prudente – SP.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro, 2014.

R. W. FOX, A. T. MCDONALD E P. J. PRITCHARD. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 8ª. Edição, LTC Editora, 2010.

RABL, A. Optical and termal properties of compound parabolic concentrator. **Solar Energy**, v.18, 1976.

SABOIA, A. L.; SAMPAIO, J. L. F. **Situando a crise da água no Brasil.** São Luiz-MA, 2016. Disponível em:<[http://www.eng2016.agb.org.br/resources/anais/7/1468287311\\_ARQUIVO\\_Artigo.pdf](http://www.eng2016.agb.org.br/resources/anais/7/1468287311_ARQUIVO_Artigo.pdf)>. Acesso em 25 jun. 2020.

S. Tapia S. y J.A. **Concentrador parabólico compuesto: una descripción opto-geométrica.** Revista mexicana de física 55 (2) 141–15. México, 2009.

SILVA, L. M; SILVA, F. V; SILVA, A. A. V; MOREIRA, H. A. M. **Desenvolvimento de um dessalinizador térmico solar para uso no setor rural do agreste Pernambucano.** IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2015.

W. T. WELFORD, R. WINSTON. **The Optics Of Nonimaging Concentrators: Light and Solar Energy**. Academic, New York, 1978.

YUNUS A. ÇENGEL / MICHAEL A. BOLES. **Termodinâmica**. 7. Ed, 2013.