

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO**

**GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO PROCESSO HELIOTÉRMICO,  
COM ESTIMATIVA DE VIABILIDADE NO BRASIL**

**Alunos:**

Ive Teixeira Egalon

Mateus Ribeiro Ramos

Yasmim Alves Moreira

**Orientador:**

Prof. M. Sc. Cláudio Márcio de F.da Silva

**Coorientador:**

Prof. Esp. Aloano Régio de A. Pereira

**Avaliadores:**

Prof. Msc. Cláudio Márcio de F.da Silva

Prof. Msc. Edson de Paula Carvalho

Prof. Msc. Francisco Roberto S. de Abreu

**VOLTA REDONDA**

**2019**

**RESUMO**

Um dos principais objetivos da humanidade é descobrir formas alternativas para a geração de eletricidade através de fontes renováveis, ou seja, gerar eletricidade com fontes combustíveis inesgotáveis. Uma tecnologia que tem chamado muito a atenção são as usinas Heliotérmicas, que se utilizam de conceitos da óptica para funcionar. Através de espelhos a luz do sol é refletida a um receptor, assim causando o efeito da física conhecido como a reflexão. Esse tipo de tecnologia foi utilizada por Arquimedes (282 a 212 a.C.), os concentradores solares, como são conhecidos, foram utilizados como arma de guerra, para queimar seus adversários, algumas décadas depois, por volta 1864 d.C., na Europa, foi criada uma fornalha que utilizava uma lente de 1,32 metros e outra secundária de 0,2 metros, assim fazendo com que os raios solares fossem focados, chegando a uma temperatura de 1750°C, já no ano de 1983 foi criada a primeira planta comercial de concentradores, gerando cerca de 14MW, construída pelo laboratório Sandia. Na atualidade contamos com algumas geradoras em funcionamento, um exemplo é a usina de Noor I localizada no Marrocos gerando cerca de 160MW.

Atualmente existem quatro modelos de concentradores solar, a qual vamos abordar neste trabalho. O mais difundido é o modelo calha parabólica que funciona com espelhos em formato côncavo linear com receptores à frente do foco solar para que assim o calor aqueça o fluido que passa pela tubulação, o concentrador linear Fresnel funciona de maneira parecida à calha parabólica, mas seus espelhos estão alinhados uns com os outros e o formato dos espelhos é normalmente linear, o suporte do receptor é fixo acima do concentrador, os espelhos se movem de forma independente por meio de motores acoplados as pontas, já o modelo torre solar recebe a reflexão do sol através de espelhos que estão ao redor da torre formando um ângulo de 180° ou 360°, assim fazendo com que o receptor preso ao seu topo receba o máximo de calor dos raios solares, o modelo disco parabólico normalmente utiliza o motor Stirling, o concentrador tem um formato côncavo, assim todo o calor e foco de luz é voltado para o motor, que funciona com base no aquecimento do fluido interno gerando movimento nos pistões, esse movimento é transferido ao gerador elétrico para que transforme essa energia mecânica em elétrica.

**Palavras-chave:** Heliotérmica, Concentrador solar, energia solar térmica.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: REFLEXÃO DIFUSA .....	9
FIGURA 2: ÂNGULO DE REFLEXÃO DA LUZ EM UMA SUPERFÍCIE PLANA.....	9
FIGURA 3: MODELO TORRE SOLAR.....	12
FIGURA 4: CONCENTRADOR PARABÓLICO .....	13
FIGURA 5: USINA CONCENTRADORA LINEAR FRESNEL.....	14
FIGURA 6: CONCENTRADOR DE DISCO PARABÓLICO .....	15
FIGURA 7: SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE CALOR E GERAÇÃO DE ENERGIA. ....	17
FIGURA 8: PRIMEIRO MOTOR CRIADO POR ROBERT STIRLING .....	18
FIGURA 9: DIAGRAMA PRESSÃO X VOLUME E REPRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO CICLO STIRLING TIPO BETA .....	20
FIGURA 10: DIAGRAMA TEMPERATURA X ENTROPIA .....	20
FIGURA 11: MAPA CLIMÁTICO/ IRRADIAÇÃO DO BRASIL. ....	22
FIGURA 12: GRÁFICO DE GERAÇÃO E ACUMULO DE CALOR DA USINA HELIOTÉRMICA GEMASOLAR .....	23
FIGURA 13: COMPARAÇÃO DAS PERDAS DE REFLETIVIDADE ENTRE DIFERENTES COLETORES DIAS APÓS A LIMPEZA .....	24
FIGURA 14: VISTA COMPLETA DO PROTÓTIPO HELIOTÉRMICO DE DISCO PARABÓLICO.....	26
FIGURA 15: MOTOR STIRLING LIGADO AO GERADOR DC .....	26
FIGURA 32: GRÁFICO DA TENSÃO GERADA EM RELAÇÃO AO TEMPO.....	28
FIGURA 33: GRÁFICO DA ROTAÇÃO EM RELAÇÃO A TENSÃO GERADA. ....	28
FIGURA 34: GRÁFICO DA TEMPERATURA EM RELAÇÃO A TENSÃO GERADA. ..	28

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CLASSIFICAÇÃO DOS COLETORES SOLARES POR GRAUS DE RASTREAMENTO .....	11
TABELA 2: CARACTERÍSTICAS DE DIFERENTES TECNOLOGIAS CSP.....	11
TABELA 3: DADOS DO COLETOR DISCO PARABÓLICO .....	13
TABELA 4: DADOS DO COLETOR DISCO PARABÓLICO DA EURODISH. ....	16
TABELA 5: CUSTO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NO PROTÓTIPO .....	29

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
1.1	Tema 7	
1.2	Justificativa	8
1.3	Metodologia	8
1.4	Objetivo	8
<b>2</b>	<b>ENERGIA HELIOTÉRMICA</b>	<b>9</b>
2.1	Elementos Físicos	9
2.1.1	Reflexão	9
2.2	A história da energia Heliotérmica	10
2.3	Coletores solar	10
2.4	Modelos de Concentradores Solar	11
2.4.1	Torre Solar	11
2.4.1.1	Vantagens e desvantagens do sistema de Torre Solar	12
2.4.2	Calha Parabólica	12
2.4.2.1	Vantagens e desvantagens do sistema de Calha Parabólica	13
2.4.3	Linear Fresnel	14
2.4.3.1	Vantagens e desvantagens do sistema tipo Fresnel	14
2.4.4	Disco Parabólico	15
2.4.4.1	Vantagens e desvantagens do sistema de disco parabólico	16
2.5	Armazenamento térmico	17
2.6	Motor Stirling	17
2.6.1	História do motor Stirling	17
2.6.2	Funcionamento do motor Stirling	19
2.6.3	Configurações dos Motores Stirling	19
2.6.4	Ciclo termodinâmico do motor de Stirling	19
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b>	<b>21</b>
3.1	Procedimento metodológico	21
3.2	Irradiação solar no Brasil	21
3.3	Geração segura	22
3.4	Manutenção	23

3.5	Protótipo .....	25
3.5.1	Cálculos das áreas e quantidade de espelhos .....	26
3.6	Testes de desempenho do protótipo .....	27
3.7	Estimativa de custos e geração de uma usina heliotérmica .....	29
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>34</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Tema

Se compararmos as décadas anteriores o consumo de eletricidade atualmente subiu exponencialmente, com os diversos avanços tecnológicos para melhor conforto das tarefas do nosso cotidiano, temos um grande aumento na produção e consumo de diversos eletroeletrônicos, e com essa grande demanda devemos ter a capacidade de suprir com o menor impacto possível ao meio ambiente.

Hoje muito se fala de energia renovável, o Brasil é um país com grande capacidade em geração de energia elétrica e tem cerca de 80% da sua matriz energética renovável, mas com pouca diversidade, segundo EPE e ANEEL em 2018 60,6% da geração se deu por meio hídrico.

Com o baixo volume de chuvas dos últimos anos muitas barragens operaram com níveis baixos ou tiveram que suspender suas operações, fazendo o Brasil passar por um grande racionamento de água nas cidades mais populosas do país, além do aumento de produção de energia não renovável para suprir a demanda de produção hídrica, recorrendo as termoeletricas que tem um elevado custo de produção, elevando o preço do KWh além do prejuízo ao meio ambiente.

O sol é uma fonte eficiente e limpa de geração de energia que pode ser aproveitada, a energia solar vem crescendo e desenvolvendo com passar do tempo, onde podemos destacar a energia solar térmica e a energia solar fotovoltaica.

Existem três modos de conversão de energia solar térmica: de calor para energia térmica, de radiação para calor e de energia mecânica para energia elétrica. Já a fotovoltaica transforma diretamente os fótons da radiação solar em energia elétrica por meio de reações químicas com os elementos semicondutores da placa fotovoltaica.

Esse trabalho irá explorar o uso da geração de energia através de heliotérmica, existem quatro tipos de coletores solar: a torre central, o cilindro parabólico, a linear Fresnel e o disco parabólico. Os três primeiros citados funcionam com o mesmo princípio apesar de utilizarem modos diferentes de aproveitar os raios solares, basicamente eles são refletidos para um ponto de concentração que chega a altas temperaturas aquecendo um liquido que irá evaporar gerando um fluido de alta pressão que será direcionado a turbina acoplada a um gerador, após a passagem do fluido pela turbina o liquido é condensado para reiniciar o ciclo, a diferença em relação

a termoelétrica fica por conta da não utilização de combustíveis fósseis e sim do calor proveniente do sol.

Já no disco parabólico o processo pode ser o mesmo dos outros três modelos anteriores, mas é comum utilizar cada disco como um gerador independente acoplado um motor Stirling ao ponto de concentração do disco.

## **1.2 Justificativa**

A escolha do tema foi motivada pela busca de novos meios de geração de eletricidade renovável que sejam eficientes, devido à grande necessidade de diversificação da matriz energética do Brasil, pois ainda é muito dependente de suas hidrelétricas que apesar de ser uma energia limpa pode sofrer com épocas de seca, além disso a demanda com o passar dos anos vem aumentando e devemos procurar formas de geração alternativas que causem menos danos ao meio ambiente.

## **1.3 Metodologia**

A fim de concretizar esse trabalho com sucesso, usaremos os seguintes métodos:

- Pesquisa bibliográfica em artigos, monografias, documentários, dissertações e livros;
- Desenvolvimento de um protótipo para demonstração das bases teóricas;
- Testes de desempenho com protótipo desenvolvido;
- Comparação com outras tecnologias existentes;

## **1.4 Objetivo**

Com este trabalho temos o objetivo de demonstrar um método pouco explorado de geração de eletricidade renovável eficiente, buscando uma diversificação da matriz energética do Brasil, iremos explicar o modo de funcionamento da Energia Solar Térmica Concentradora ou simplesmente Heliotérmica, com aplicações, o conceito de geração, local mais indicado de viabilização de uma heliotérmica no Brasil, estimativas comparativas entre a heliotérmica e a hidrelétrica e desenvolver um protótipo de pequena escala do modelo disco parabólico para demonstrar seu funcionamento prático.

## 2 ENERGIA HELIOTÉRMICA

### 2.1 Elementos Físicos

#### 2.1.1 Reflexão

É um fenômeno com o qual utiliza a reflexão da luz, conhecido como fenômeno ótico, ocorre quando há um feixe de luz que rebate em uma superfície espelhada fazendo com que a luz se propague novamente ao meio com a mesma intensidade.

Existem dois tipos de reflexão, uma é denominada reflexão difusa, quando o feixe luminoso se propaga em um meio irregular. Os raios de luz incidentes atingem a superfície de forma linear e refletem de forma desordenada, conforme figura 1.

A outra forma de reflexão é a regular, quando os raios incidentes tocam na superfície são refletidos da mesma forma a qual o atingiu, o local atingido pela luz é linear e uniforme conforme figura 2.

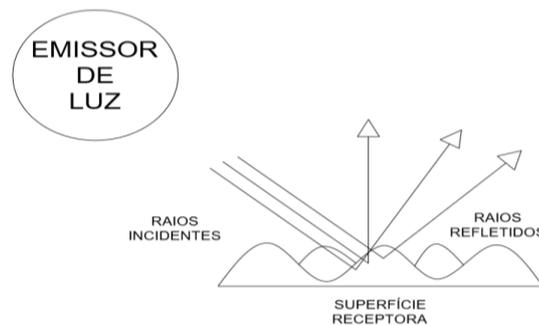


Figura 1: Reflexão difusa  
Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Quando utilizado espelhos, por exemplo, ocorre a incidência de raio de luz (RI) que for um ângulo ( $i$ ) com a normal do espelho, o raio refletido (RR) terá um ângulo ( $r$ ) com a normal do local de recepção, como mostra a figura 2.

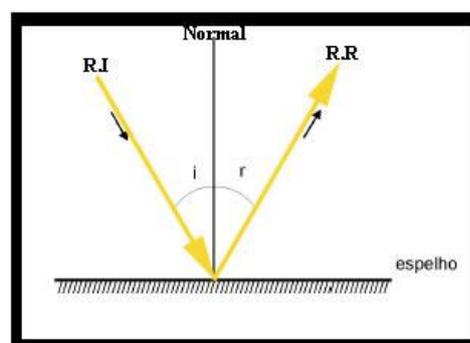


Figura 2: Ângulo de reflexão da luz em uma superfície plana  
Fonte: Brasil escola (2015)

- A 1ª lei da reflexão: O raio incidente (RI) à normal e o raio refletido são coplanares, estão no mesmo plano.
- A 2ª lei da refração: O ângulo de incidência é o mesmo que ângulo de reflexão ( $r = i$ ).

Com esse efeito é possível criar pontos focais de luz em outros objetos, exemplo, é utilizado comumente na região Nordeste do Brasil, são colocados espelhos em um ângulo específico qual reflete a luz do sol sobre a água para esquentá-la, já que ele está diretamente apontado para o recipiente e tendo uma maior incidência de luz.

## 2.2 A história da energia Heliotérmica

Uma das maiores plantas de concentradores solar na época em 1912, fora construída por Frank Shuman e Charkes Vernon Boys, a beira do rio Nilo, no Egito. Ocupava cerca de 1200m<sup>2</sup>, havia cilindros parabólicos com o tamanho de 62 metros e 4,5 metros de largura, a bomba que operava no local tinha vazão de 22,7m<sup>3</sup> por minuto e era operada através de vapor, com potência de 75kw. (RAGHEB, 2011 apud LODI, 2011).

Em 1979 no novo México foi construída a primeira fazenda de coletores solar, a radiação solar como fonte de energia, fora construída pelo laboratório Sandia (Sandia National Laboratory).

A primeira planta comercial gerou cerca de 14MW, entrou em operação em 1983, em seguida construíram mais oito geradores por cilindro-parabólico, assim gerando cerca de 10 a 80MW, a empresa responsável acabou falindo e vendeu todas as plantas separadamente para empresas investidoras, e elas continuam em operação até a atualidade.

## 2.3 Coletores solar

Coletores solar utilizam a trocar de temperatura para poder transformar calor, ele aquece um fluido, o produto virá vapor e pode rotacionar turbinas, tem o mesmo princípio de funcionamento de uma termoelétrica. Pode ser utilizado um motor Stirling que é aquecido através de uma ignição acoplado, funcionando através do ciclo termodinâmico. (KALOGIROU, 2009 apud MALAGUETA, 2012)

Existem alguns modelos de coletores, Torre Linear, Calha Parabólica, Linear Fresnel, Sistema motor/disco parabólico como mostrado na tabela 2.

A maior vantagem dessa tecnologia é a sua fonte de combustível, sendo renovável e inesgotável.

Noor 1, uma fazenda solar, é a fase inicial de outras quatro geradoras, porém, a quarta fase será uma usina fotovoltaica, pretendem gerar cerca de 14% da sua energia utilizando como combustível o sol, com objetivo de produzir 52% de energia elétrica até 2030 o que evitará a importação de energia, o plano inicial era até 2020 gerarem cerca de 2000 MW, um valor quase inimaginável para esse tipo de geração.

Os coletores solares tendem a ser classificados em estado estacionário ou rastreador, os rastreadores podem seguir em um ou dois eixos.

Veja as tabelas 1 e 2 com os principais modelos e algumas características deles.

Tabela 1: Classificação dos coletores solares por graus de rastreamento

Motora	Coletor	Receptor	Taxa de concentração	Faixa de temperatura (°C)
Estacionário	Solar plano	Plano	1	30 a 80
	Tubular a vácuo	Plano	1	50 a 200
Rastreamento em 1 eixo	Parabólico composto	Tubular	1 – 5	60 a 240
			5 – 15	60 a 300
	Refletor linear Fresnel	Tubular	10 – 40	60 a 250
Rastreamento em 2 eixos	Cilíndrico parabólico	Tubular	10 – 85	60 a 400
	Disco parabólico	Pontual	600 – 2000	100 a 1500
	Heliostato (torre central)	Pontual	300 – 1500	150 a 2000

Fonte: KALOGIROU (2009)

Tabela 2: Características de diferentes tecnologias CSP

Tecnologia	Faixa de capacidade indicada (MW)	Taxa de concentração	Eficiência solar-elétrica (%)	Área requerida (m <sup>2</sup> /kW) *
Parabólico	10-200	70-80	10-15	18
Fresnel	10-200	25-100	9-11	-
Torre	10-150	300-1000	8-10	21
Disco	0,01-0,4	1000-3000	16-18	20

Fonte: KALOGIROU (2009)

## 2.4 Modelos de Concentradores Solar

### 2.4.1 Torre Solar

Essa configuração consiste em vários heliostatos que por sua vez é composto por quatro espelhos (planos ou levemente côncavos), cada pilar tem uma área refletora que pode variar entre (50 e 250m<sup>2</sup>) e podem ser distribuídos em 360° ou 180° (figura 3), estes espelhos fazem

o rastreamento dos raios solares em 2 eixos, para obter melhor radiação no receptor no alto da torre. (MALAGUETA, 2013)

O calor coletado na ponta da torre é transmitido para um fluido (água, óleo ou outro fluido) com o qual é armazenado e utilizado para produzir trabalho. (KALOGIROU, 2009)

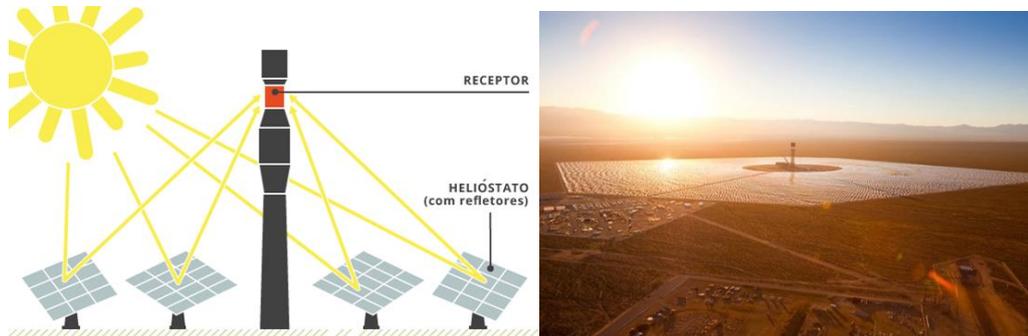


Figura 3: Modelo Torre Solar  
Fonte: Portal Solar (2019)

A maior heliotérmica do mundo fica na Califórnia no Deserto de Mojave (figura 3), com capacidade de 354MW e contém três plantas, com o qual tem a área de mais de 14,16Km<sup>2</sup>.

#### 2.4.1.1 Vantagens e desvantagens do sistema de Torre Solar

- Por receber raios solares em um único ponto a temperatura de trabalho pode variar de 300° a 1500°;
- Fácil transmissão da energia térmica;
- Possibilidade de geração de energia 24h por meio de acúmulo de temperatura em um tanque quente;
- Indicado para sistemas de maior potência (+10MW);

#### 2.4.2 Calha Parabólica

Este tipo de configuração compõe-se de um tipo de refletor com formato parabólico que direciona a radiação solar para uma tubulação que fica no foco do sistema, algumas vezes essa tubulação é revestida com um cilindro de vidro para evitar a perda de calor. O fluido de trabalho é um óleo sintético que trabalha entre as temperaturas de 300° a 400°, a energia térmica deste fluido é utilizada para geração de eletricidade ou para um processo que utilize calor (figura 4).

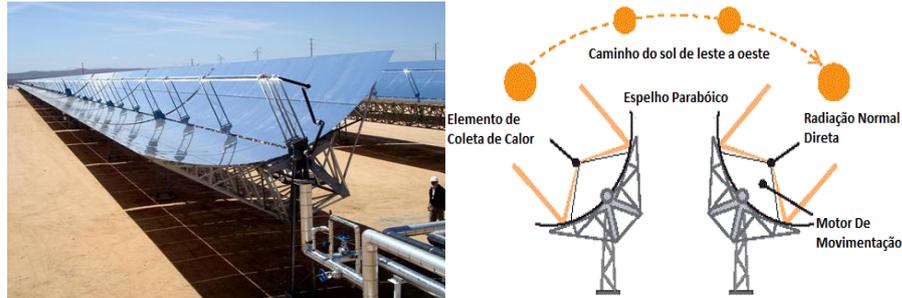


Figura 4: Concentrador parabólico  
Fonte: RENEWABLE POWER NEWS (2009)

Este tipo de gerador utiliza um sistema onde possibilita o rastreamento dos raios solares para ajustes na inclinação do cilindro parabólico. O sistema pode ser projetado com seu comprimento de Leste-Oeste com rastreamento do sol de norte a sul, ou com comprimento de norte-sul com rastreamento do sol de leste a oeste (figura 4).

Cada um deles traz vantagens e desvantagens. Quando o rastreamento é feito no eixo Leste-Oeste, a vantagem é que os espelhos se movimentam pouco durante o dia e ficam diretamente voltados para o sol de meio dia. Porém o rastreamento norte-sul recebe mais radiação no início do dia e fim da tarde. (MALAGUETA, 2013)

A tabela 3 apresenta os parâmetros de um modelo de gerador parabólico construído pela Industrial Solar Technology (IST).

Tabela 3: Dados do coletor Disco parabólico

Parâmetro	Valor/tipo
Ângulo de abertura do coletor	70°
Superfície refletiva	Acrílica prateada
Material do receptor	Aço
Abertura do coletor	2,3m
Tratamento da superfície do receptor	Níquel escurecido altamente seletivo
Absorbância	0,97
Emitância (80C)	0,18
Transmitância do vidro de revestimento	0,96
Diâmetro externo do absorvedor	50,8mm
Precisão do mecanismo de rastreamento	0,05°
Orientação do coletor	Eixo N-S
Modo de rastreamento	Horizontal leste-oeste

Fonte: KALOGIROU (2009)

#### 2.4.2.1 Vantagens e desvantagens do sistema de Calha Parabólica

A utilização do terreno onde os coletores de canal parabólico estão dispostos é aproveitado de forma eficiente, já que os coletores estão dispostos em filas. Essa configuração dos coletores solares só é vantajosa em locais cujo terreno possui baixas inclinações, pois esta inclinação pode afetar o direcionamento dos raios solares para o tubo absorvedor.

A tecnologia de concentração solar melhor desenvolvida é a dos sistemas de Calha Parabólica.

A temperatura de operação do óleo sintético como fluido de trabalho nesse tipo de sistema fica limitada a no máximo 500°C e, desta forma, limita a eficiência da potência neste tipo de geração.

Tubulação acoplada a estrutura que acompanha o movimento dos espelhos impedindo o uso de alta pressão devido as emendas e material utilizado ser mais maleável facilitando sua movimentação.

### 2.4.3 Linear Fresnel

Os coletores lineares Fresnel contêm três partes: contendo um certo número de fileiras de espelhos onde cada eixo central está em paralelo um com o outro no mesmo plano (vide Figura 5). Os espelhos são levemente curvados, da mesma forma dos espelhos concentradores da calha parabólica, o recobrimento é feito de prata e possuem, em geral, 3 mm de espessura.

A estrutura dos coletores deve estar paralela ao eixo Norte-Sul, os espelhos são acoplados a motores de passo que através de sensores, rastreiam o sol e movimentam os espelhos no eixo Leste-Oeste para poder ter um melhor aproveitamento dos raios solares do nascer ao poente.

O fluido utilizado, geralmente água, recebe calor dos refletores, onde vira vapor. O vapor passa por turbinas acopladas em geradores onde a partir desse processo inicia a geração de energia (vide figura 5).

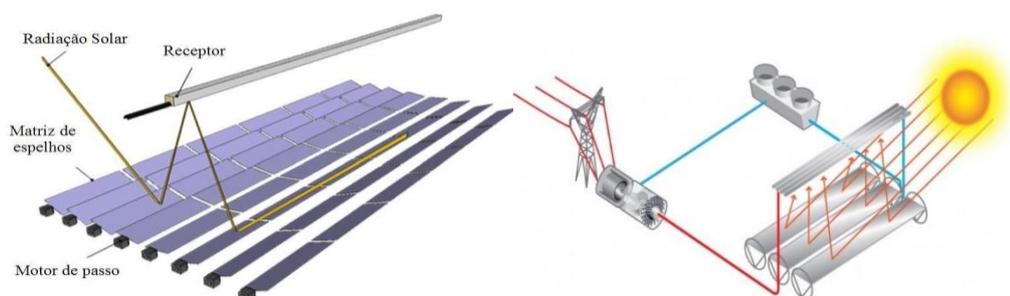


Figura 5: Usina concentradora linear Fresnel  
Fonte: energy.gov (2019)

#### 2.4.3.1 Vantagens e desvantagens do sistema tipo Fresnel.

- Espaço de ocupação de até 2/3 menores se comparado ao coletor tipo calha parabólico.

- Tubulação do receptor fixa, conseguindo trabalhar com pressões mais altas.
- O modelo linear Fresnel é capaz de gerar vapor diretamente nos receptores de energia solar, dispensando a utilização de trocadores de calor.
- Devido ao modo em que os refletores se situam, onde são quase paralelos ao chão, possibilitando a ocorrência de menos danos por conta do vento, também diminui perda de luminosidade e os refletores sofrem menos impactos, gerando menos manutenções.
- O custo da produção dos espelhos é menor devido ao formato plano.
- Levam desvantagem no nascer do sol e quando ao pôr devido ao sombreamento que pode haver entre os espelhos devido a inclinação do sol nesses horários.

#### 2.4.4 Disco Parabólico

Este tipo de refletor tem a aparência de um disco côncavo, seu formato parabólico mantém a concentração dos raios solares em um ponto focal no centro (vide figura 6), a estrutura do refletor e receptor move-se juntos em dois eixos com o objetivo de rastrear e acompanhar a incidência dos raios solares com o maior aproveitamento possível do nascer ao poente.



Figura 6: Concentrador de disco parabólico  
Fonte: PORTAL SOLAR (2016)

Por possuir o rastreamento solar em dois eixos e uma concentração pontual dos raios solares, o disco parabólico possui a maior taxa de concentração (600 a 2500) se comparado aos outros modelos é considerado o mais eficiente. Consequentemente, consegue alcançar uma temperatura muito elevada de até 1500°C ficando atrás apenas da torre solar que pode alcançar incríveis 2000°C.

Os raios que atingem a parábola são concentrados no ponto focal que é absorvida pelo receptor, este calor acumulado pode ser utilizado de duas maneiras:

- Aquecendo um fluido que será transportado por tubulação a um sistema central que irá movimentar uma turbina;

- Ou aquecer o fluido interno em um motor Stirling onde está acoplado a um gerador no ponto focal do disco, este modo também é conhecido como dish-stirling.

O segundo modo é o mais utilizado, é mais interessante tanto tecnicamente (devido a perdas térmicas) quanto economicamente para gerar eletricidade em cada disco, do que conduzir o calor de cada disco até um sistema de geração central (KALOGIROU, 2009).

A tabela abaixo apresenta algumas características do modelo disco parabólico da EuroDish.

Tabela 4: Dados do coletor disco parabólico da EuroDish.

Diâmetro do concentrador	8,5m
Área	56,6m <sup>2</sup>
Distância focal	4,5m
Taxa de concentração média	2500
Capacidade elétrica bruta	9kW
Capacidade elétrica líquida	8,4kW
Refletividade	0,94
Fluido de trabalho	Hélio
Pressão do gás	20-150bar
Temperatura do receptor e do gás	650°C

Fonte: DGS (2005)

Os motores Stirling operam no ciclo termodinâmico através do aquecimento e refrigeração de um fluido constante, variando um pistão. Esse tipo de sistema converte cerca de 30% de energia solar em eletricidade, onde a potência no sistema varia de 5 a 50 kW.

#### 2.4.4.1 Vantagens e desvantagens do sistema de disco parabólico

- O concentrador tipo disco parabólico não consegue armazenar energia térmica. Sendo mais adequado para a geração distribuída.
- Os discos parabólicos são mais eficientes que os outros sistemas de concentração solar.
- Podem ser instalados em terrenos acidentados pois cada disco gerador é independente uns dos outros. Além disso se instalados com gerador independente obtém-se um aproveitamento maior por causa da menor perda térmica.
- Ao utilizar o ciclo do motor Stirling, não há necessidade da utilização de água para resfriar o motor podendo ser facilmente resfriando pelo próprio ar. Deste modo o consumo de água pelo disco parabólico é mínimo, sendo utilizado apenas para limpeza dos espelhos e manutenção.

## 2.5 Armazenamento térmico

O armazenamento opera com tanques de sais fundidos, que são levados ao concentrador. Esse sal pode chegar em temperaturas em torno de  $565^{\circ}\text{C}$ , após esse aquecimento ele retorna aos reservatórios para manter a energia térmica. Quando necessita de gerar mais energia ou quando não tem mais o sol, o calor armazenado é utilizado para a água entrar em ebulição, para que rotacione as turbinas e gerem eletricidade através de vapor. Em média o tempo de armazenamento chega a 10 horas, temos como exemplo a usina de Crescent Dunes localizada no estado de Nevada, Estados Unidos.

O sal é utilizado por suas propriedades físicas e térmicas que possibilita um melhor armazenamento, algumas usinas heliotérmicas utilizam somente água no sistema, não é um sistema tão eficiente pois a água é muito volátil e perde calor mais rápido que o sal (figura 7).

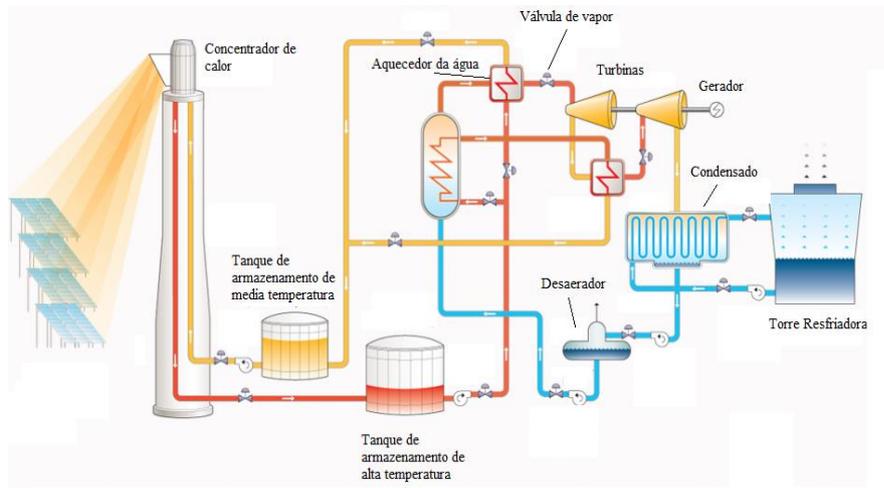


Figura 7: Sistema de armazenamento de calor e geração de energia.  
Fonte: Energia Solar (2019)

## 2.6 Motor Stirling

### 2.6.1 História do motor Stirling

No início do século XIX, época da revolução industrial o emprego do motor a vapor era muito comum e auxiliava nas diversas tarefas do campo, mineração entre outros. Devido aos materiais de baixa qualidade utilizados na época e a baixa tecnologia metalúrgica existente para a elaboração da caldeira, era muito comum destas máquinas explodirem durante o uso devido à alta pressão interna ocasionando diversos acidentes.

Pensando em uma forma de evitar os acidentes causados pelas máquinas de vapor, entre os anos de 1816 e 1818, o pastor Escocês Robert Stirling com o auxílio de seu irmão

James Stirling projetaram o que na época denominaram de “economizador” de calor conhecido atualmente como “regenerador”.

Neste motor (figura 8), o calor é provocado pela combustão de um material abrasivo em uma fornalha, os gases da combustão passavam por B, F e saíam em uma chaminé em A. Em F, está posicionado o cilindro quente do motor Stirling. O êmbolo de deslocamento C, é o responsável por deslocar o fluido de trabalho do local de expansão para o de compressão. O pistão D é o de trabalho. Com o aquecimento do fluido de trabalho no segmento quente do motor (espaço de expansão) e resfriamento na parte fria (espaço de compressão), e com um mecanismo para sincronizar o movimento destes pistões, havia o movimento no motor (BARROS, 2005).

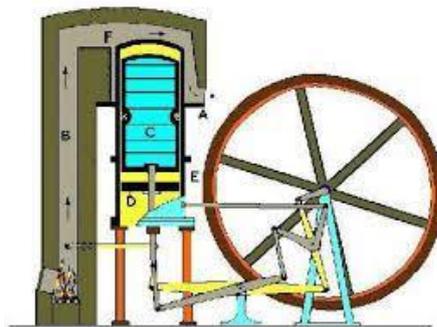


Figura 8: Primeiro motor criado por Robert Stirling  
Fonte: Cruz, 2012

Em 1843, as modificações ao projeto realizadas por Robert Stirling e seu irmão James Stirling já haviam possibilitado um incremento de potência considerável para até mesmo movimentar máquinas em uma fundição de Dundee na Escócia, mesmo que com muitas dificuldades técnicas (HIRATA, 1995).

No ano de 1930 pesquisadores da Philips Company na Holanda, reconheceram a grande ideia de Robert Stiling e seu irmão com grande capacidade de utilização para as mais diversas áreas. Desde então, foram investido milhões de dólares que aliados as novas tecnologias existentes conseguiram desenvolver motores Stirling com bom funcionamento, silenciosos, com elevada eficiência e com a possibilidade de usar qualquer fonte de calor.

As principais funcionalidades são na propulsão veicular, geração direta de potência hidráulica, geração de eletricidade e como bomba de calor (Martini, 1983).

### **2.6.2 Funcionamento do motor Stirling**

O motor Stirling é uma máquina térmica com capacidade de utilizar fonte de calor como combustível para seu funcionamento, capaz de entregar um grande rendimento energético, chegando a uma eficiência teórica próxima a máquina de Carnot. Um motor Stirling contém em seu interior um fluido de trabalho normalmente um gás pressurizado (ar, hélio ou hidrogênio). A potência mecânica é obtida com o aquecimento e resfriamento deste fluido no interior do cilindro, é um motor diferente de combustão interna em que o movimento é gerado através da queima explosiva em seu interior. O gás de trabalho é movimentado entre a parte fria e quente do motor por meio de pistões ocorrendo assim uma mudança de temperatura no gás de trabalho, que provoca uma diferença na pressão interna do cilindro que gera uma força para mover o pistão de trabalho que leva este movimento ao eixo do motor.

Para um melhor aproveitar o ciclo do motor Stirling é possível utilizar do regenerador que é basicamente um espaço temporário de armazenamento de calor encontrado entre a parte quente e fria do motor que possibilita o fluido de trabalho passar por um determinado sentido tendo como objetivo reter no interior do sistema o calor que seria trocado com o ambiente externo.

### **2.6.3 Configurações dos Motores Stirling**

O funcionamento do ciclo de Stirling necessita de quatro etapas para o desenvolvimento de potência: compressão a temperatura constante, aquecimento a volume constante, expansão a temperatura constante e rejeição de calor a volume constante. É, então, inexecutável realizar o ciclo empregando-se somente um pistão. Conseqüentemente, nos motores Stirling em sua maioria, se tem duas zonas com distintas temperaturas, em que o fluido de trabalho corre de um lado para o outro. O deslocamento deste fluido é realizado por dois pistões (pistão de compressão e de expansão) nos motores Stirling de dois pistões, e pelo deslocador (displacer) nos motores Stirling de deslocamento, (HIRATA, 1995).

### **2.6.4 Ciclo termodinâmico do motor de Stirling**

Na (figura 9 e 10) podemos observar o ciclo do motor Stirling e ao lado as etapas do tipo Beta, os diagramas do tipo Gama e Alfa são muito semelhantes ao tipo Beta e por este motivo não serão apresentados.

Ao iniciar o ciclo, entre as etapas 1 e 2 temos uma expansão isotérmica - O ar no interior do motor sofre expansão aproximadamente isotérmica, absorvendo o calor da fonte externa e aumentando sua pressão fazendo que o pistão de trabalho se movimente até que chegue ao volume limite do cilindro.

Entre as etapas 2 e 3 temos um resfriamento isovolumétrico – Quando o pistão de trabalho chega ao limite por meio do volante, o pistão de movimento é direcionado ao fundo do cilindro movimentando o ar no interior do motor da parte quente para a parte fria do motor para ser resfriado perdendo seu calor e pressão a um volume constante.

Entre as etapas 3 e 4 temos uma compressão isotérmica – A partir deste ponto o volante que sincroniza os movimentos do pistão de deslocamento e trabalho já tem inercia suficiente para continuar o processo, então o pistão de trabalho irá comprimir o ar enquanto pistão de deslocamento irá ocupar o lugar na parte quente do motor a fim de que o ar rejeite calor para o sistema de resfriamento, mantendo a temperatura constante.

Entre as etapas 4 e 1 temos um aquecimento isovolumétrico – Pelo movimento do volante o pistão de movimento irá subir enquanto o pistão de trabalho comprime, empurrando o ar para o fundo do cilindro onde receberá novamente calor aumentando novamente sua temperatura e pressão.

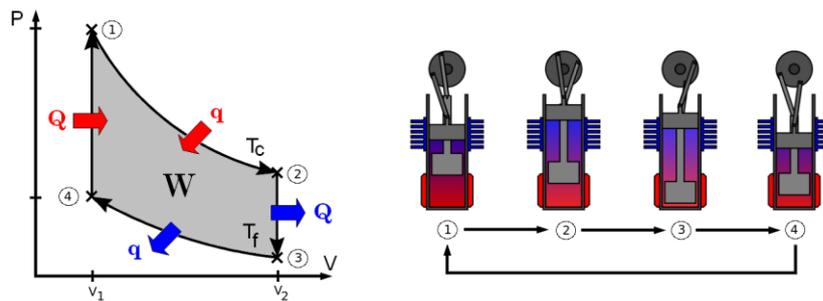


Figura 9: Diagrama Pressão x Volume e representação do funcionamento do ciclo Stirling tipo Beta

Fonte: fisicaexpdemostrativos.uniandes (2010)

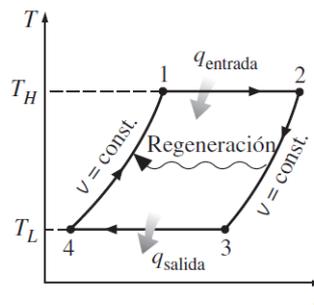


Figura 10: Diagrama Temperatura X Entropia

Fonte: Cengel, (2012)

### **3 ESTUDO DE CASO**

#### **3.1 Procedimento metodológico**

O estudo de caso deste trabalho tem o intuito de demonstrar o funcionamento de um protótipo de um concentrador solar de energia com escala reduzida, para demonstrar o modo de geração de energia elétrica de uma heliotérmica modelo disco parabólico, comparar valores em gráficos de tensão versus rotação, tempo de funcionamento em relação a tensão gerada, tensão gerada versus temperatura de operação, análise de viabilidade de um local mais próximo do ideal no nosso país para construção de uma fazenda de CSP. A metodologia utilizada neste estudo consiste em um protótipo de pequena escala para testes de desempenho com instrumentos como multímetro, termovisor e tacômetro para obtenção de dados, como tensão, temperatura do motor, rotação do motor, tempo de funcionamento e análise da interferência das condições climáticas nos dias dos testes.

#### **3.2 Irradiação solar no Brasil**

A irradiação é um dos pontos mais importantes para um concentrador solar, pois o seu funcionamento é baseado na emissão da luz sobre um ponto reflexivo que foca essa luminosidade em um objeto, conhecido como coletor, agindo em um receptor e assim fazendo todo funcionamento de uma geradora de eletricidade por concentradores solar.

A partir desse conceito pode ser transformado energia solar em mecânica e dessa energia gerar eletricidade, para que isso possa acontecer, no caso de uma geradora heliotérmica modelo disco parabólico com motor Stirling como receptor, será através do foco luminoso apontado para o bulbo do motor que proporcionará o aquecimento do fluido interno que irá se expandir e depois será resfriado pelas aletas contraindo o fluido interno por meio do pistão de trabalho, este movimento irá gerar um movimento em uma haste presa ao motor, ocasionando movimento por meio de um volante acoplado ao eixo de um gerador, este movimento de rotação irá gerar a corrente elétrica.

Com a diversidade de climas distribuídos pelo Brasil se tem uma variação de ambiente muito grande como mostra a figura 11, uma fazenda de concentradores solar precisa do máximo de incidência solar direta, com o mínimo possível de dias chuvosos e nublados, com estas informações o local ideal para construção seria em locais como desertos e no Brasil o clima que mais assemelha ao clima desértico é o clima árido e semiárido presente no nordeste do Brasil,

estes locais normalmente possuem poucos recursos necessários para sobrevivência humana então dificilmente são habitados o que se torna uma grande vantagem para este tipo de geração.

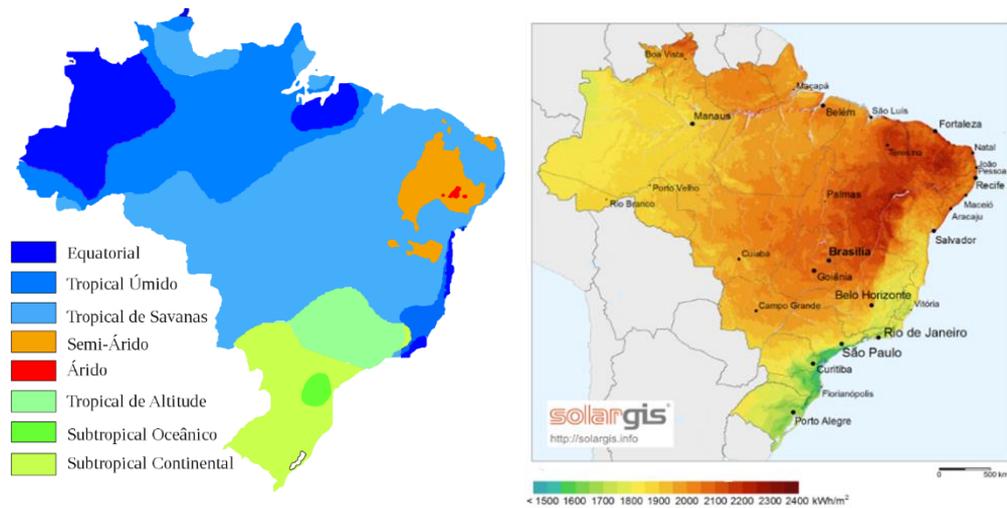


Figura 11: Mapa climático/ irradiação do Brasil.  
Fonte: Girardi (2005).

No Brasil as regiões de maior intensidade de irradiação ficam entre o Centro-Oeste, Norte e principalmente no Nordeste como podemos ver na figura 11 nas partes mais vermelhas isso é muito propício também pois determina os locais com maior capacidade de geração. A região Nordeste também possui o menor IDH (índice de desenvolvimento humano) do país com média de 0,608. Boa parte das pessoas desta região do país vivem em um estado precário e sub-humano por falta recursos, como água, alimentos e saúde. Devido aos problemas com pouca chuva e solo muito seco a agricultura não é viável em diversas áreas, com a construção de usinas heliotérmicas na região muito possivelmente seriam atraídos empresas e recursos para estas populações além de empregos melhorando a qualidade de vida na região.

### 3.3 Geração segura

Mesmo que a fonte de energia de uma heliotérmica seja o sol, este tipo de geração conta com um grande potencial de armazenamento térmico, então mesmo durante a noite não haverá falta de produção pois o calor armazenado durante o dia poderá ser utilizado durante a noite, com as tecnologias atuais já existem armazenamento térmico de mais de 12 horas, no caso de vários dias nublados ou chuvosos o impacto na produção de eletricidade pode ser reduzido com o sistema de aquecimento independente por meio de biogás e biomassa para suprir o baixo aquecimento dos concentradores nesses dias.

As CSP's são capazes de suportar grandes variações em relação a geração de energia elétrica, por exemplo, um grande horário de pico com o qual é necessário suprir grande parte

da demanda de consumo energético, ou uma baixa demanda. As quedas de energia ou como conhecidos “apagões” são de baixa riscos devido a esse armazenamento térmico, e são de baixo risco para os seres humanos com baixa probabilidade de explosões e vazamentos, mínimo risco de panes, sendo eles evitados e controlados, além de ser uma fonte de fornecimento segura. Na figura 12 podemos visualizar o gráfico da usina heliotérmica Gemasolar na Espanha com 15 horas de armazenamento térmico, é possível ter uma ideia da potência gerada, nível de radiação solar e o nível do tanque quente durante uma semana no verão e uma semana no inverno. (energiaheliotermica.gov, 2019).

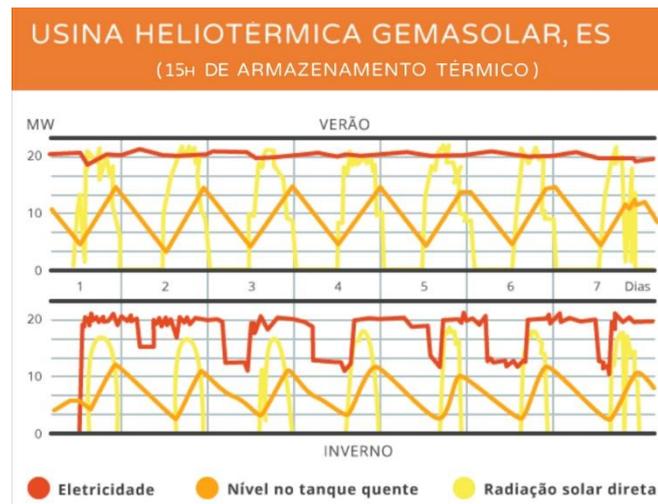


Figura 12: Gráfico de geração e acumulo de calor da usina heliotérmica GemaSolar  
Fonte: helietermica.gov (2019)

Esse tipo usina de geração de eletricidade é uma das formas mais limpas de produção de energia elétrica, pois não emite dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para atmosfera assim não influenciando no aquecimento global, não é necessário a extração de combustível do solo, diminuído o risco aos prestadores de serviço para esse tipo de geração, os riscos de explosões na captação de combustível são mínimos, e no local de sua sede não ocorre poluição do ar ou solo.

### 3.4 Manutenção

Apesar do alto investimento para implementação de uma usina de energia solar térmica concentrada, a despesa de manutenção é muito baixa se comparado as usinas de gás, carvão e nucleares, outra grande vantagem é a não necessidade de compra de combustíveis pois utilizada apenas a radiação solar para este fim.

Uma manutenção adequada se torna peça importante neste tipo de geração pois é capaz de prolongar a vida útil dos equipamentos, diminuir os riscos de uma parada repentina e aumentar a produção entre 10% e 30% se comparada a uma usina sem as devidas manutenções, diminuindo assim o custo total ao longo dos anos de funcionamento.

A quantidade necessária de manutenções programadas varia de uma planta para outra e serão determinadas principalmente pela recomendação dos projetistas, análise das condições climáticas do local de instalação da usina, expectativa de produção e da recomendação de manutenção feita pelos fabricantes dos equipamentos instalados, abaixo serão apresentados os principais tipos de manutenção existentes.

No coletor solar ocorre a perda de reflexão devido ao desgaste natural do material e ao acúmulo de partículas sobre o mesmo, deve ser limpo com frequência para que não ocorra perdas significativas de eficiência, o custo de limpeza dos coletores é o maior neste tipo de geração mas diversas tecnologias estão sendo desenvolvidas para diminuir estes custos e para que ocorra a mínima necessidade na utilização dos recursos hídricos, a periodicidade da limpeza dos coletores varia em relação ao local e a época do ano.

Na figura 13 podemos ver o gráfico gerado por meio de um estudo realizado em uma planta de estudo da Luisiana localizado no sudeste dos Estados Unidos com três coletores diferentes, analisando a perda de refletividade com o passar dos dias após a última limpeza.

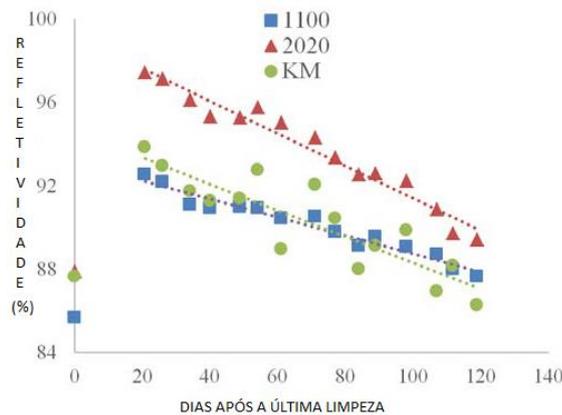


Figura 13: Comparação das perdas de refletividade entre diferentes coletores dias após a limpeza  
Fonte: SciencePG (2017)

O bloco de potência funciona como o coração da usina onde o fluido que os coletores aqueceram é transformador em vapor ocasionando o movimento em uma turbina acoplada a um gerador, onde a energia térmica é transformada em energia mecânica para posteri-

ormente ser transformada em energia elétrica. As manutenções são especificadas pelos fabricantes para serem realizadas levando em consideração as horas de funcionamento de cada equipamento, podemos citar:

- Inspeccionar todos os encanamentos, flanges e válvulas quanto a vazamentos;
- Inspeccione desgaste ou dano elétrico;
- Tensão de correias;
- Rolamentos de gerador e lubrificação;
- Limpeza na ventilação no gerador;
- Verifique o funcionamento do sistema de ar comprimido;
- Substituição de correias;
- Verificar a diferença de pressão do fluido;
- Verificar o funcionamento de equipamentos de segurança (botões, luzes, etiquetas);
- Substitua as baterias PLC;

Ocorre também a manutenção e limpeza da torre de resfriamento e condensadora para que não ocorra a obstrução dos encanamentos nem a corrosão, são feitos testes e análises como:

- Circulação da água em alta pressão pelo menos uma vez por semana para evitar a obstrução das tubulações causadas pelo lodo;
- Tratamento da água contra corrosão, lodo e proliferação de bactérias;
- Limpeza mensal de bicos e drenos para evitar o crescimento de algas;
- Devido ao acúmulo de partículas, uma vez ao ano é feito a troca do fluido aproveitando para fazer a limpeza completa do sistema de resfriamento e testes dos sensores, componentes elétricos e mecânicos;

Devem ser inspecionados toda a estrutura dos coletores, verificando cada eixo de movimentação, parafusos, soldas da estrutura, eixos de interligação e estado de degradação dos espelhos.

### **3.5 Protótipo**

Foi desenvolvido através de estudos um protótipo para simular o funcionamento de uma usina heliotérmica do modelo disco parabólico, comprovando através de testes que este

tipo de tecnologia funciona e é viável para a construção. O modelo usado para os testes foi construído com material reciclado, espelhos e um motor Stirling.

O concentrador foi reaproveitado a partir de uma antena de TV a cabo para usufruir de seu formato côncavo auxiliando no direcionamento da irradiação solar por meio de 780 espelhos de 2 por 2 cm, este coletor é fixado ao mastro que foi preso a uma base soldada com viga U para suportar o peso de toda estrutura, preso ao concentrador temos uma haste a qual foi afixada em sua ponta o motor Stirling onde será direcionado o foco dos raios solares, para diminuir a vibração da estrutura durante o funcionamento do motor fixamos uma mão francesa entre a haste da antena e um compensado preso ao motor, o motor foi a parte mais difícil de ser adquirida pois não é facilmente encontrado no Brasil então tivemos que importar, abaixo podemos ver a foto do protótipo em um dia de testes.



Figura 14: Vista completa do protótipo heliotérmico de disco parabólico  
Fonte: Registrado pelos autores (2019)



Figura 15: Motor Stirling ligado ao gerador DC  
Fonte: Registrado pelos autores (2019)

### 3.5.1 Cálculos das áreas e quantidade de espelhos

Como a antena tem um diâmetro médio = 0,63m

Temos:

$$\text{Área} = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (01)$$

Então:

$$\text{Área} = \pi * \left(\frac{0,63}{2}\right)^2 \quad (02)$$

Obtemos:

$$\text{Área do concentrador} = 0,312\text{m}^2 \quad (03)$$

Como o lado do espelho = 0,02m

Temos então:

$$\text{Área do espelho} = L^2 \quad (04)$$

Então:

$$\text{Área do espelho} = 0,02^2 \quad (05)$$

Obtemos:

$$\text{Área do espelho} = 0,0004\text{m}^2 \quad (06)$$

Para descobrir a quantidade necessária de espelhos a serem utilizados:

$$\text{Quantidade de espelhos} = \frac{\text{Área da concentrador}}{\text{Área do espelho}} \quad (07)$$

Então:

$$\text{Quantidade de espelhos} = \frac{0,312}{0,0004} \quad (08)$$

Obtemos então a quantidade necessária de espelhos no concentrador:

$$\text{Quantidade de espelhos} = 780 \text{ unidades} \quad (09)$$

### 3.6 Testes de desempenho do protótipo

Para realização dos testes foram utilizados alguns equipamentos para determinar o desempenho do protótipo, foi utilizado um multímetro para medir a tensão gerada (Volts), um tacômetro para determinar sua rotação por minuto (RPM), um termovisor para indicar sua temperatura de operação (°C).

No primeiro teste de desempenho, o protótipo foi direcionado ao sol para que iniciasse seu funcionamento pelo período de 35 minutos, a partir dos valores de tensão gerada que foram verificadas no visor do multímetro a cada 1 minuto, foi desenvolvido o gráfico abaixo:

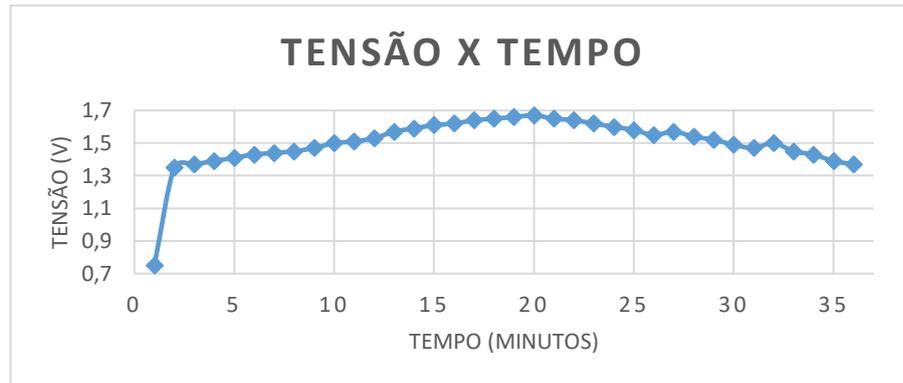


Figura 16: Gráfico da tensão gerada em relação ao tempo.  
Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

No segundo teste foi comparado a rotação e a tensão gerada :

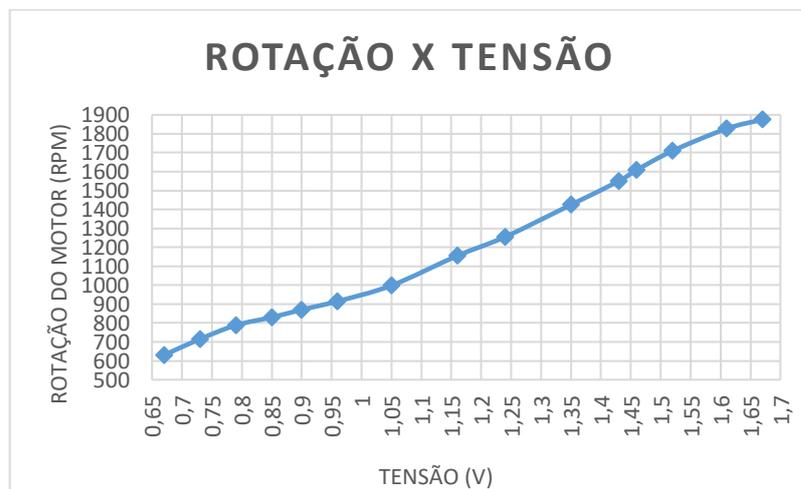


Figura 17: Gráfico da rotação em relação a tensão gerada.  
Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

No terceiro teste foi comparado a temperatura e a tensão gerada:

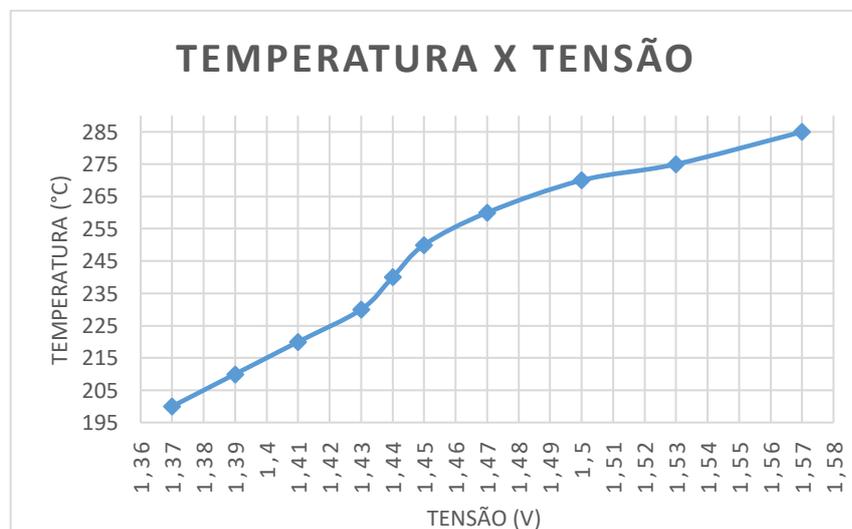


Figura 18: Gráfico da temperatura em relação a tensão gerada.  
Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

A tabela a seguir detalha os custos para montagem do protótipo:

Tabela 5: Custo dos materiais utilizados no protótipo

Motor Stirling	R\$239,00
Espelhos 2x2cm	R\$75,90
Antena com mastro	R\$20,00
Pintura	R\$35,00
Miscelâneas	R\$20,00
Mão francesa	R\$9,90
Eletrodo de solda	R\$21,50
Viga U	R\$100,00
Geradores	R\$50,00
<b>Total</b>	<b>R\$571,30</b>

Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

### 3.7 Estimativa de custos e geração de uma usina heliotérmica

Com a finalidade de apresentar uma breve comparação estimada entre a capacidade de geração dos sistemas hidrelétricos e heliotérmicos, o grupo desenvolveu com base em dados obtidos por meio de fontes governamentais e sites de pesquisa, alguns cálculos básicos para estimar o gasto necessário para implementação de três heliotérmicas em relação a capacidade de geração em uma mesma área ocupada por uma hidrelétrica comparando os novos custos e capacidades de geração em relação a nova área.

A base da nossa estimativa será a usina hidrelétrica de Três Gargantas na China e as usinas heliotérmicas Noor 1, 2 e 3 do Marrocos.

Obtivemos a área inundada, a potência instalada e o custo de implementação da usina hidrelétrica de Três Gargantas. (Altair Santos)

- Área Inundada = 1084 Km<sup>2</sup>
- Potência de Três Gargantas = 22500 MW
- Custo de implementação de 24 Bilhões de Dólares no ano 2016, ou aproximadamente 31,2 Bilhões de Dólares ajustados pela inflação por meio do índice USCPI até novembro de 2019.

Obtivemos as áreas totais, as potências instaladas e o custo de implementação das usinas heliotérmicas Noor 1, 2 e 3. (acwapower)

Dados de Noor 1:

- Área Noor 1 = 4 Km<sup>2</sup>
- Potência de Noor 1 = 160 MW

- Custo de implementação de 842 Milhões de Dólares no primeiro trimestre de 2016, ou aproximadamente 907 Milhões de Dólares ajustados pela inflação por meio do índice USCPI até novembro de 2019.

Dados de Noor 2:

- Área Noor 2 = 7 Km<sup>2</sup>
- Potência de Noor 2 = 200 MW
- Custo de implementação de 1,1 Bilhões de Dólares no segundo trimestre de 2018, ou aproximadamente 1,122 Bilhões de Dólares ajustados pela inflação por meio do índice USCPI até novembro de 2019.

Dados de Noor 3:

- Área Noor 3 = 5,5 Km<sup>2</sup>
- Potência de Noor 3 = 150 MW
- Custo de implementação de 862 Milhões de Dólares no quarto trimestre de 2018, ou aproximadamente 882 Milhões de Dólares ajustados pela inflação por meio do índice USCPI até novembro de 2019.

Com base nas áreas obtidas estimamos a quantidade de heliotérmicas que poderiam ser instaladas na área inundada da usina hidrelétrica de três gargantas.

Então:

$$QHAI = \frac{AI}{AH} \quad (10)$$

Em que:

- QHAI – Quantidade equivalente de Heliotérmicas construídas em uma área igual a inundada (unidade)
- AI – Área inundada de uma Hidrelétrica (Km<sup>2</sup>)
- AH – Área de uma fazenda de concentrador solar (Km<sup>2</sup>)

Com base no resultado de QHAI podemos calcular a potência equivalente a nova área:

$$PGH = QHAI * PH \quad (11)$$

Em que:

- PGH – Potência equivalente gerada pelas Heliotérmicas com uma área igual a inundada por Três Gargantas (MW)
- QHAI – Quantidade equivalente de Heliotérmicas construídas na área inundada (unidade)
- PH – Potência real instalada da Heliotérmica comparada (MW)

Com base no valor de implementação real podemos calcular o valor estimado por MW para fim de comparação.

$$PE = \frac{PR}{PH} \quad (12)$$

Em que:

- PE – Preço estimado por MW da usina (Dólares/MW)
- PR – Preço real de implementação corrigido pela inflação do período da usina (Dólares)
- PH – Potência real instalada (MW)

Aplicando as fórmulas acima chegamos as seguintes estimativas:

Com base na estimativa da fórmula 27 e 28 seria possível construir em uma área igual a que está inundada pela usina hidrelétrica de Três Gargantas, uma quantidade equivalente de usinas heliotérmicas igual a:

- 271 usinas heliotérmicas iguais a Noor 1, equivalentes a 44360 MW.
- 154 usinas heliotérmicas iguais a Noor 2, equivalentes a 30800 MW.
- 197 usinas heliotérmicas iguais a Noor 3, equivalentes a 29550 MW.

Com base na estimativa da fórmula 29 o preço de instalação por MW corrigido pela inflação de cada período seria aproximadamente:

- 1,39 Milhões de dólares por MW de uma usina hidrelétrica igual a Três Gargantas.
- 5,67 Milhões de dólares por MW de uma usina heliotérmica igual a Noor 1.

- 5,61 Milhões de dólares por MW de uma usina heliotérmica igual a Noor 2.
- 5,88 Milhões de dólares por MW de uma usina heliotérmica igual a Noor 3.

Os valores obtidos nos cálculos de custo do MW de uma usina heliotérmica são bem altos se comparado ao custo do MW de uma hidrelétrica, mas devemos nos atentar que possivelmente com uma área maior poderia ser aumentado a capacidade de geração dessas usinas heliotérmicas e que o custo por MW poderia diminuir muito, além disso com a necessidade de uma quantia maior de equipamentos, provavelmente seria possível diminuir o custo unitário na compra de equipamentos junto ao fabricante, mas por se tratar de um cálculo de estimativa decidimos manter os valores obtidos pois não teríamos como demonstrar de fato o valor que seria economizado.

Mas o ponto a qual devemos analisar é que por se tratar de uma tecnologia nova, muita coisa ainda deverá ser implementada para a diminuição de custos no futuro, e devido ao seu grande potencial de geração mesmo durante a noite devido ao acúmulo térmico obtido durante o dia, pode vir a ser uma grande alternativa a construções de hidrelétricas no futuro, ou no atual momento de usinas fotovoltaicas a quais ainda não possuem a capacidade de geração durante a noite.

## **4 CONCLUSÃO**

Essa pesquisa foi direcionada para área de geração de energia elétrica através de fontes renováveis. Foi visto que o investimento em tecnologias renováveis é uma necessidade a ser implementada para o futuro do país, pois uma matriz energética bem distribuída pode aliviar a alta necessidade da utilização de hidrelétricas no Brasil, que devido as secas de alguns anos atrás, sofreu com baixos níveis nos reservatórios, podemos citar também as placas fotovoltaicas que apesar da tecnologia ser muito interessante ainda faltam avanços neste tipo de geração para aumentar sua eficiência, além da desvantagem de não conseguirem gerar energia elétrica durante a noite, então como estudo dessa monografia chegamos a uma nova tecnologia de geração conhecida como heliotérmica que apesar de já ser utilizada em outros países ainda é pouco conhecida no Brasil, a heliotérmica tem um elevado custo de implementação mas demonstra ser muito eficiente, sendo capaz de gerar durante todas as 24 horas do dia devido ao seu armazenamento térmico utilizado para a produção durante a noite.

Por meio do estudo de caso demonstramos uma comparação estimada entre o sistema de uma usina heliotérmica em relação a uma usina hidrelétrica, utilizamos como parâmetros dimensão de ocupação, potência instalada e preço do MW instalado, como exemplos utilizamos as heliotérmicas Noor 1, 2 e 3 situada no deserto do Saara no Marrocos e a hidrelétrica de Três Gargantas situado em Yichang, Hunber na China, também foram realizados testes de desempenho por meio de um protótipo de uma heliotérmica do tipo disco parabólico onde mesmo com as limitações de construção demonstrou o modo de geração e o funcionamento deste tipo de tecnologia.

Com base nas estimativas obtidas durante o estudo de caso podemos concluir que a geração heliotérmica pode ser tão eficiente em termos de potência gerada, guardada as devidas proporções, quanto uma hidrelétrica caso seja instalada em um local adequado, atentando-se as variáveis climáticas, irradiação solar do local e manutenções necessárias.

Devido as análises realizadas no mapa climático e de irradiação (figuras 25 e 26), chegamos à conclusão que seria muito viável a instalação de uma CSP no Brasil, mais precisamente na região do Nordeste, principalmente entre os estados de Pernambuco, Piauí e Bahia, que são regiões com grande capacidade de irradiação solar e com o clima mais próximo do desértico, pontos importantes para implementação de uma usina heliotérmica, podemos citar também que a construção deste tipo de tecnologia nesses locais possivelmente contribuiria para o crescimento do desenvolvimento destes estados.

Foi possível concluir com base neste estudo que a grande dificuldade de implementação desta tecnologia no Brasil seria o alto valor de investimento inicial para a construção, pois nosso país não possui empresas especializadas para a construção dos equipamentos necessários, principalmente por ainda ser uma tecnologia “nova” para o Brasil, porém foram desenvolvidos alguns projetos de estudo em universidades, esses modelos tem como objetivo principal o estudo e a análise de viabilidade da tecnologia no nosso país.

Concluimos que o estudo realizado apresentou dados que comprovam a viabilidade deste tipo de tecnologia no Brasil, e que além dos benefícios de ser uma geração limpa e aumentar a diversificação da matriz energética, a possível implementação de uma usina heliotérmica no Nordeste, local onde o IDH (índice de desenvolvimento humano) é o mais baixo do país, poderá atrair investimentos, desenvolvimento, recursos e empregos para essa região aumentando a qualidade de vida dessas pessoas. Concluimos também que o protótipo desenvolvido demonstrou o princípio de um concentrador solar em pequena escala por meio de testes de desempenho desta tecnologia comprovando seu funcionamento e sua viabilidade.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Centro de referência para as energias solar e eólica sérgio de s. brito - cresesb. **Coletores solar, definições gerais e específicas**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>.

Acessado em: Abril de 2019

Portal energia heliotérmica. **Artigos sobre funcionamento norma e definições. Apresentação: pesquisa voltada para área de geração de energia**. Disponível em: < [ergiaheliotermica.gov.br](http://ergiaheliotermica.gov.br) > acessado em: Abril de 2019

Leonardo S. R. Vieira, Ana Paula C. Guimarães e Pablo A. Lisboa. **Renováveis, energia completares. Atitude editora, 2018**. Acessado em: Maio de 2019

Isabela Tereza Magacho, Gustavo Borges e Silva, Gabriel Gonçalves Pessoa de Castro. **Desenvolvimento de um motor stirling movido a energia solar**, 2016. Acessado em: Maio de 2019

Isabela Martins Maranhão. **Estudo sobre à tecnologia heliotérmica e sua viabilidade no brasil**, 2014. Acessado em: Maio de 2019

Trajano de Souza Viana, **potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no brasil**, 2010. Acessado em: Maio de 2019

Robledo Wakin Barros. **Avaliação Teórica e Experimental do Motor Stirling Modelo Solo 161 Operando com Diferentes Combustíveis**, 2005. Acessado em: Maio de 2019.

Energy efficiency & renewable energy. **Linear Fresnel plant illustration**. Solar energy technologies office. Disponível em < [energy.gov](http://energy.gov). > Acessado em: Junho de 2019

Brasil escola. **Reflexão da luz**. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/reflexao-luz-espelhos-planos.htm>> Acessado em: Junho de 2019

Edson Ronaldo Pautz. **Estudo e projeto de um motor stirling**, 2013. Acessado em: Agosto de 2019

Gustavo Dienstmann. **Energia Solar uma comparação de tecnologias**, 2009. Acessado em: Agosto de 2019.

Diego C. Malagueta. **Geração heliotérmica princípios e tecnologias**, 2012. Acessado em: Agosto de 2019.

NRL transforming energy. **NOOR I**. Disponível em: < <https://solarpaces.nrel.gov/noor-i> > Acessado em: Novembro de 2019

Acwa power. **Mapa de CSP's, 2018**. Disponível em < <https://www.acwapower.com/en/projects/assets/>> em: Novembro de 2019

Cássio Mauri de Oliveira Filho. **Metodologia para estudo de implantação de uma usina heliotérmica de receptor central no Brasil**, 2014. Acessado em: Novembro de 2019.

Ambiente energia. **Energia heliotérmica**. Acessado em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2017/09/usina-heliotermica-nos-eua-gera-energia-24-horas-por-dia/29834>> acessado em: Novembro de 2019

Portal energia. **Sistema seguidor solar**. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/em-que-consiste-sistema-seguidor-solar-fotovoltaico/>> Acessado em: Novembro de 2019

Ritter III. **Maintenance of a Small-Scale Parabolic Trough Concentrating Solar Power Plant in Louisiana**. < [https://www.researchgate.net/publication/322530317\\_Maintenance\\_of\\_a\\_Small-Scale\\_Parabolic\\_Trough\\_Concentrating\\_Solar\\_Power\\_Plant\\_in\\_Louisiana](https://www.researchgate.net/publication/322530317_Maintenance_of_a_Small-Scale_Parabolic_Trough_Concentrating_Solar_Power_Plant_in_Louisiana)> Acessado em: Novembro de 2019