

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE ENERGIA

**Desenvolvimento de um Sistema Concentrador
Heliotermoeletrico de Efeito Seebeck**

ALUÍZIO ASSINI FERNANDES

Itajubá, Dezembro de 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

**Desenvolvimento de um Sistema Concentrador
Heliotermoeletrico de Efeito Seebeck**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Planejamento e Gestão de Sistemas Energéticos

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

Co-Orientador: Prof. Dra. Márcia Regina Baldissera Rodrigues

Itajubá, Dezembro de 2020



Emitido em 08/12/2020

ATA Nº 27/2020 - PRPPG32003013004M9 (11.45.12)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 09/12/2020 11:22)
ADHIMAR FLAVIO OLIVEIRA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
II-Q (11.48)
Matricula: 3695760

(Assinado digitalmente em 11/12/2020 13:29)
MARCIA REGINA BALDISSERA RODRIGUES
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
IRN (11.49)
Matricula: 1029909

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.unifei.edu.br/documentos/> informando seu número: 27, ano: 2020, tipo: ATA, data de emissão: 08/12/2020 e o código de verificação: 056a2133e7

PENSAMENTO

*"Olho nenhum viu, ouvido
nenhum ouviu, mente nenhuma
imaginou o que Deus preparou
para aqueles que o amam";
1 Coríntios 2:9*

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação primeiramente a Deus, por ter me guiado na conclusão deste trabalho, aos meus pais, Domingos Francisco Fernandes e Elzira Assini Fernandes pela educação e valores transmitidos à minha pessoa, pois sem vocês, tudo seria muito difícil. À minha esposa Carla Matilde Guimarães de Oliveira e à todos os professores e profissionais que me ajudaram a alcançar esse objetivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e oportunidade de realização de mais uma conquista. Agradeço a minha esposa Carla Matilde G. de Oliveira, que sempre acreditou e apoiou minha pessoa.

Ao meu orientador, o Professor Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho, na qual tenho uma enorme dívida de gratidão por ter me recebido na universidade, pelos ensinamentos, auxílio e incentivos.

A minha coorientadora, Professora Dra. Márcia Regina Baldissera Rodrigues, pelo enorme auxílio, atenção e paciência.

Ao professor Dr. Rero Marques Rubinger e ao professor Dr. Adhimar Flávio Oliveira pela enorme contribuição e ensinamento transmitidos à minha pessoa.

Aos amigos que ganhei e aos professores que tive durante o mestrado, onde me ensinaram muito neste tempo de dedicados estudos.

Agradeço gentilmente a CAPES pela concessão da bolsa de mestrado, pois foi fundamental para por me dedicar aos estudos, pesquisas e desenvolvimento do meu projeto, objeto este, tema desta dissertação.

RESUMO

O trabalho proposto nesta dissertação mostra os procedimentos para dimensionamento, construção e testes de um conversor de energia que combina a tecnologia heliotérmica concentrada (CSP) associado a refrigeradores termoelétricos (TEC) de forma a converter a energia térmica em energia elétrica de maneira direta seguindo o princípio de Seebeck sem a necessidade de equipamentos convencionais de transformação de energia elétrica tais como turbinas e geradores elétricos convencionais. O uso de refrigeradores termoelétricos (TEC) para converter energia térmica oriunda dos raios solares concentrados em energia elétrica ainda é pouco explorado, o que torna este trabalho pioneiro, abrindo uma nova linha de pesquisa em sistemas de conversão solares de energia. . Para os testes foram construídos dois protótipo testados em campo. A relação de eficiência apresentada entre os dois sistemas de concentração solar, dimensionados, construídos e testados pelo autor, mostraram-se promissores visto que os resultados obtidos em testes de bancada resultaram satisfatórios, o que permitiu verificar a viabilidade operacional do sistema proposto.

Palavras chave: Sistemas heliotérmicos; Concentradores solares; Fontes alternativas de energia; Energia renovável; Refrigeradores termoelétricos; Tecnologias de concentração solar.

ABSTRACT

The work proposed in this dissertation shows the procedures for dimensioning, construction and testing of an energy converter that combines concentrated heliothermic technology (CSP) associated with thermoelectric coolers (TEC) in order to convert thermal energy into electrical energy directly following the Seebeck principle without the need for conventional electrical energy transformation equipment such as conventional electric turbines and generators. The use of thermoelectric coolers (TEC) to convert thermal energy from concentrated sunlight into electrical energy is still little explored, making this work a pioneer, opening a new line of research in solar energy conversion systems. . For testing, two field-tested prototypes were built. The efficiency ratio presented between the two solar concentration systems, designed, built and tested by the author, proved to be promising since the results obtained in bench tests were satisfactory, which allowed to verify the operational viability of the proposed system.

Keywords: Heliothermic systems; Solar concentrators; Alternative energy sources; Renewable energy; Thermoelectric coolers; Solar concentration technologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conversão da energia solar em energia elétrica	21
Figura 2– Concentrador Fresnel Linear	24
Figura 3 – Concentradores Cilíndrico-parabólico.....	25
Figura 4 – Esquema básico da conversão heliotérmica em eletricidade	25
Figura 5 – Concentrador Disco Parabólico	26
Figura 6 – Esquema básico de um motor Stirling tipo Alfa	27
Figura 7 – Esboço simplificado da conversão heliotérmica em eletricidade	27
Figura 8 – Torre de Concentração (Espanha)	28
Figura 9 – Esquema simplificado da tecnologia Torre de concentração.....	28
Figura 10 – Usina heliotérmica de San Nicolò de d’Arcidano (Itália).....	32
Figura 11 – Usina heliotérmica Ashalim (Israel).....	32
Figura 12 –Efeito Peltier	34
Figura 13 – Efeito Seebeck.....	35
Figura 14 – Efeito Thomson	36
Figura 15 – Estrutura do gerador termelétrico (TEG)	40
Figura 16 – Esquema simplificado de um dispositivo termoelétrico	41
Figura 17 – Cristal elementar de bismuto	43
Figura 18 – Cristal elementar de telúrio.....	44
Figura 19 – Célula unitária do telureto de bismuto	45
Figura 20 – Taxa de concentração.....	50
Figura 21 – Distância de abertura do coletor	51
Figura 22 – Relação entre distância focal e ângulo de borda	52
Figura 23 – Perfil parabólico do primeiro protótipo	54
Figura 24 – Perfil parabólico do segundo protótipo	55
Figura 25 – Esquema do primeiro sistema concentrador solar proposto.....	56
Figura 26 – Bancada de testes	57
Figura 27 - Perfil cilíndrico-parabólico.....	57
Figura 28 – Estrutura de sustentação	57
Figura 29 – Fixação dos espelhos	58
Figura 30 – Coletor solar	58
Figura 31 – Tinta de alta performance	58
Figura 32 – Fixação dos módulos Peltier.....	58
Figura 33 – Conduto d’água.....	59
Figura 34 – Núcleo termogerador	59
Figura 35 – Esquema detalhado do núcleo termogerador	59
Figura 36 – Sistema de refrigeração.....	60
Figura 37 – Esquema do segundo concentrador solar proposto	61
Figura 38 – Molde do concentrador solar.....	62
Figura 39 – Revestimento em mdf	62
Figura 40 – Montagem do núcleo termogerador.....	62
Figura 41 – Núcleo termogerador	63
Figura 42 – Suporte de fixação.....	63

Figura 43 – Sistema de refrigeração.....	64
Figura 44 – Termômetro Infrared Global Eye	65
Figura 45 – Wattímetro digital DW - 6060	65
Figura 46 – Potenciômetro.....	66
Figura 47 – Bomba submersa Anauger Ecco 60973.....	67
Figura 48 - Piranômetro Kipp e Zonen CM4.....	67
Figura 49 – Espectofotômetro Stellar Net SL1	68
Figura 50 – Unidade Fonte/Medida SMU Keithley 2600 A	69
Figura 51 – Termoômetro Icel TD - 911	69
Figura 52 – Termômetro STC-1000	70
Figura 53 Temperatura registrada pela manhã	71
Figura 54 – Temperatura registrada a tarde	71
Figura 55 – Análise de comportamento do primeiro concentrador solar	72
Figura 56 – Temperatura focal	73
Figura 57 – Bancada de testes.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características de desempenho da tecnologia CSP	23
Tabela 2 – Propriedades termoelétricas de alguns materiais e ligas.....	39
Tabela 3 – Parâmetros analisados com o primeiro concentrador solar	71
Tabela 4 – Parâmetros analisados com o segundo concentrador solar	74
Tabela 5 – Limites utilizados para ajuste dos parâmetros.....	77
Tabela 6 – Potência solar em função do índice de radiação solar	80
Tabela 7 – Parâmetros extraídos através do EDA e dos dados experimentais.....	82
Tabela 8 – Parâmetros medidos e calculados	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Potência instalada solar em 2016.....	29
Gráfico 2 – Geração e potência instalada solar em 2016.....	30
Gráfico 3 – Capacidade total instalada por país.....	30
Gráfico 4 – Tecnologia CSP em operação no mundo	31
Gráfico 5 – Figura de mérito de materiais tipo n	37
Gráfico 6 – Figura de mérito de materiais tipo p	38
Gráfico 7 – Relação entre ângulo de borda e relação a/f	53
Gráfico 8 – Relação entre o ângulo de borda e a relação a/f	54
Gráfico 9 – Índice de radiação solar versus temperatura focal	72
Gráfico 10 – Comportamento do núcleo termogerador.....	81
Gráfico 11 – Rendimento do sistema em função da potência elétrica.....	82
Gráfico 12 – Rendimento do sistema em função da radiação solar.....	84
Gráfico 13 – Rendimento do sistema em função da corrente elétrica.....	85
Gráfico 14 – Relação entre o ângulo de borda e a relação a/f	86
Gráfico 15 – Potência instalada solar em 2016.....	86

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CSP	Concentrated Solar Power
CRESESB	Centro de Referência Para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito Massachusetts Institute of Technology – Instituto de Tecnologia de
ISC	Corrente de circuito aberto
MIT	Massachusetts
MME	Ministério de Minas e Energia
RLF	Refletor Linear Fresnel
α	Coefficiente de Seebeck
Z	Figura de mérito
η	Condutividade térmica
ρ	Condutividade elétrica
K	Kelvin
VOC	Tensão de circuito aberto

SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2. Objetivo Geral	17
1.3. Objetivo Específico	17
1.4 Justificativa	17
1.5 Estrutura do Trabalho.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Estado da Arte sobre Geração Heliotérmica	20
2.2 Família de Concentradores Heliotérmicos	23
2.2.1 Concentradores Frenel Linear	23
2.2.2 Concentradores Cilíndrico-parabólico	24
2.2.3 Concentradores Disco Parabólico	26
2.2.4 Torre de Concentração	27
2.3 Cenário Geral Sobre o Uso da Energia Heliotérmica no Mundo.....	29
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
3.1 Termoeletricidade	33
3.1.1 Efeito Peltier.....	33
3.1.2 Efeito Seebeck.....	34
3.1.3 Efeito Thomson	36
3.2 Figura de Mérito.....	37
3.3 Geradores Termoelétricos	39
3.3.1 Elementos Químicos Utilizados em Geradores Termoelétricos.....	41
3.4 Equações de Desempenho de Geradores Termoelétricos	46
3.4.1 Parâmetros Máximos de desempenho do gerador termoelétrico.....	47
4. ESTUDO DE CASO	50
4.1 Dimensionamento do Sistema Concentrador Heliotérmoelétrico de Efeito Seebeck	50
4.2 Construção do Primeiro Sistema Concentrador Heliotermoelétrico de Efeito Seebeck	55
4.2.1 Construção do Coletor Solar	57
4.2.2 Núcleo Termogerador	58
4.2.3 Sistema de Refrigeração.....	59
4.3 Construção do Segundo Sistema Concentrador Heliotermoelétrico de Efeito Seebeck	60

4.3.1 Coletor Solar	62
4.3.2 Núcleo Termogerador	63
4.3.2 Sistema de Refrigeração.....	63
4.4 Equipamentos Utilizados nos Ensaios	64
4.4.1 Termômetro Digital Infravermelho	64
4.4.2 Wattímetro.....	65
4.4.3 Potenciômetro.....	66
4.4.4 Bomba Submersa.....	66
4.4.5 Piranômetro	67
4.4.6 Espectrofotômetro	68
4.4.7 Unidade Fonte/Medida SMU	68
4.4.8 Termômetro Icel TD-911	69
4.4.9 Controlador de Temperatura Digital STC-1000.....	70
4.5 Ensaios com o Primeiro Sistema Concentrador Heliotermoelétrico de Efeito Seebeck	70
4.6 Ensaios com o Segundo Sistema Concentrador Heliotermoelétrico de Efeito Seebeck	73
5. METODOLOGIA	75
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	80
6.1 Análise do Primeiro Sistema Concentrador Heliotermoelétrico de Efeito Seebeck	80
6.2 Análise do Segundo Sistema Concentrador Heliotermoelétrico de Efeito Seebeck	82
7. CONCLUSÃO	88
8. SUGESTÕES	90
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXO I.....	101
APÊNDICE I	102

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Devido a escassez dos recursos naturais não renováveis utilizados em grande parte do mundo em suas matrizes energéticas para geração de energia elétrica, nos últimos anos vem ocorrendo uma diversificação destas matrizes energéticas utilizando recursos renováveis como recursos eólico e solar pelo baixo impacto ambiental, uma vez que recursos fósseis impactam enormemente o solo e emitem grandes quantidades de CO₂ na atmosfera.

A energia solar é uma das fontes de energia que mais cresce no mundo. A tecnologia solar fotovoltaica (PV) assim como a tecnologia heliotérmica concentrada (CSP) Concentrated Solar Power estão se tornando atraentes cada vez mais na produção de eletricidade, sendo uma solução viável economicamente e totalmente sustentável.

O Brasil é um país que possui um elevado potencial solar que propicia excelentes condições para a implantação de plantas solares tanto fotovoltaica quanto heliotérmica (CSP), tendo em vista dispor de grandes áreas com disponibilidade de radiação solar e a proximidade do equador, o que proporciona ótimos índices de radiação solar. A geração de eletricidade a partir da tecnologia heliotérmica é uma excelente opção para o setor elétrico brasileiro, predominantemente hídrico, pois a medida que o nível das barragens decrescem nos períodos de seca, aumenta o potencial solar devido à menor interferência de nuvens e radiação solar mais intensa, com períodos de tempo maiores. (CAVALCANTI, 1999).

A vantagem da tecnologia heliotérmica concentrada está na possibilidade de ser associada a sistemas de armazenamento de energia em forma de calor. Assim, dependendo da tecnologia implantada, é possível gerar energia elétrica mesmo quando não há Sol, em dias nublados ou durante a noite (AMBIENTE ENERGIA, 2015).

De acordo com Singh et al (2015), com o uso de geradores termelétricos (TEG) aliados a energia heliotérmica é possível gerar energia elétrica, o que viabiliza sua aplicação podendo ser utilizada em plantas solares, pois dispensa o uso de partes mecânicas como geradores elétricos, condensadores, entre outros, resultando em um sistema de energia silencioso, confiável, favorável ao meio ambiente.

O trabalho proposto nesta dissertação combina a tecnologia heliotérmica concentrada (CSP) associado a geradores termelétricos (TEG) de forma a converter a energia térmica em energia elétrica de maneira direta seguindo o princípio de Seebeck

sem a necessidade de equipamentos convencionais de transformação de energia elétrica como turbinas e geradores elétricos convencionais.

1.2. Objetivo Geral

O objetivo geral dessa dissertação é desenvolver e testar o Sistema Concentrador Heliotermoelétrico de Efeito Seebeck utilizando módulos Peltier comerciais como fonte de calor por meio de um concentrador solar integrado a um sistema de refrigeração estabelecendo assim um gradiente de temperatura entre as faces dos módulos, propiciando geração de energia elétrica.

1.3. Objetivo Específico

O presente trabalho tem como seguintes objetivos específicos:

- Projetar e construir o protótipo do sistema concentrador heliotermoelétrico composto de uma calha no formato cilíndrico-parabólico revestido por vidros espelhados;
- Projetar e construir um núcleo termogerador constituído por um conjunto de refrigeradores termoelétricos, tendo um dos lados das faces aquecidas pelos raios solares refletidos pela superfície espelhada do concentrador e as faces opostas sendo refrigerada com água;
- Testar o comportamento e a eficiência do sistema concentrador heliotermoelétrico desenvolvido.

1.4 Justificativa

A energia heliotérmica é um grande recurso energético, uma tecnologia com excelente potencial que vem conquistando cada dia mais espaço no mundo, porém no Brasil, onde há incidência do Sol em sua maior parte do dia, existem poucas pesquisas científicas e suportes que possam contribuir no desenvolvimento e implantação dessa tecnologia como um grande investimento em energia elétrica alternativa. Tecnologia essa que é uma grande aposta mundial na área de fontes alternativas de energia elétrica.

Justifica-se a relevância de se realizar esse estudo pois se trata de uma pesquisa nova dentro da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e também considerando que existem poucas fontes para pesquisa dentro desse tema no país, causa essa que indiretamente pode atrasar a criação de um pólo heliotérmico no Brasil.

Justifica-se a relevância desse trabalho no fato de se realizar estudos mais aprofundados sobre a combinação da tecnologia de concentradores solares cilíndrico-

parabólico com geradores termoelétricos (TEG) para produção de eletricidade. Trata de um trabalho ainda inédito no país, que poderá servir de fonte de consulta para trabalhos futuros frente a carência desse tipo de desenvolvimento no país.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está fundamentado em 8 capítulos estruturado da seguinte maneira:

Capítulo 1 – Considerações Iniciais – É feita uma introdução ao tema de energias renováveis, a dependência do recurso hídrico e o potencial da energia solar disponível no território brasileiro, além de apresentar os objetivos geral e específico do presente trabalho, além da justificativa e motivação do trabalho proposto.

Capítulo 2 – Revisão da Bibliográfica – É apresentado um breve histórico a uma revisão bibliográfica e do estado da arte no campo da energia solar e dos coletores concentradores solares.

Capítulo 3 – Fundamentação Teórica – é apresentado os fundamentos teóricos sobre os princípios de Peltier, Seebeck e módulos termoelétricos e a transformação da energia termoelétrica.

Capítulo 4 – Estudo de Caso – Dimensionamento, construção e testes de dois protótipo.

Capítulo 5 – Metodologia – São apresentados os procedimentos metodológicos, fórmulas, materiais utilizados na construção do protótipo do concentrador solar e os testes de comportamento operacional do sistema concentrador heliotermelétrico de efeito Seebeck.

Capítulo 6 – Análise dos Resultados – São apresentados os resultados experimentais e suas análises utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 7 – Conclusão – Serão feitas as considerações e conclusões em função dos resultados e suas análises.

Capítulo 8 – Sugestões – São apresentadas sugestões de trabalhos futuros e por fim, são listadas as bibliografias consultadas e citadas no presente trabalho.

Capítulo 9 – Por fim são listadas as referências bibliográficas utilizadas nesta dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo (LODI, 2012 apud PHILIBERT, 2010), de uma forma geral, a conversão da energia solar em energia elétrica pode ser feita por meio de duas rotas principais, sendo estas a conversão térmica ou conversão fotovoltaica. A conversão térmica envolve ciclos termodinâmicos, ou seja, necessita de turbinas para transformar a energia térmica em energia mecânica e a energia mecânica em energia elétrica. A conversão fotovoltaica (direta), não necessita de sistemas auxiliares. O efeito fotovoltaico é uma combinação de dois fenômenos: fotocondutividade (através da geração de pares elétron-buraco) e separação espacial de cargas pelo potencial de uma junção p-n ou de uma barreira schotkky. A conversão fotovoltaica pode ser aplicada em pequenos sistemas autônomos, descentralizados, em geral, operando em geração distribuída (GD) e em grandes centrais, de modo centralizado (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, 2017).

Com o uso da energia solar concentrada para geração de energia elétrica, surge uma nova rota, alternativa e viável. Segundo (SHOUYUAN, 2017 Apud KOUMOTO, 2005), a tecnologia de energia solar concentrada CSP (Concentrated Solar Power), é gerada a partir do aquecimento de um fluido por meio de concentradores solares revestidos por espelhos reflexivos.

De acordo com (SHOUYUAN, 2017, Apud SALES, 1999), a energia solar desempenhou um papel essencial como uma das tecnologias mais exploradas nos últimos anos. Em 2013, a capacidade instalada global de energia solar aumentou 35%, enquanto a capacidade instalada de energia eólica aumentou 12% em quanto a energia geotérmica e energia hidroelétrica inferior a 5%.

De acordo com (CAVALLARO, 2015 Apud BARLEV, 2011), O uso da tecnologia de energia solar concentrada (CSP) para a exploração de energia solar oferece excelentes oportunidades para o crescimento industrial. Uma linha importante de pesquisa aplicada diz respeito à integração de sistemas de CSP com outras fontes renováveis e energia fóssil, com a exploração de gás, o que representa uma solução possível e concreta pela redução dos custos de produção e maior competitividade comercial.

A tecnologia CSP oferece uma variedade de aplicações e combinações onde a energia solar pode ser usada adequadamente, pois vem apresentando uma infinidade de avanços e inovações tecnológicas (CAVALLARO, 2015). Entre várias combinações

utilizando a tecnologia CSP, Khaled (2015), utiliza um conceito em combinar a tecnologia fotovoltaica com refrigeradores termoelétricos e geradores termoelétricos como um modelo híbrido. O primeiro dispositivo é uma célula solar de múltiplas junções (MJSC) o segundo dispositivo é chamado de gerador termoelétrico (TEG) e o terceiro é chamado de refrigerador termoelétrico, ambos funcionam através de um fenômeno chamado efeito Seebeck.

Segundo Singh (2015), a aplicação de geradores termoelétricos (TEG) é possível pela conversão direta do gradiente de temperatura em energia elétrica. O efeito Seebeck ocorre quando existe uma diferença de temperatura entre dois condutores ou semicondutores elétricos diferentes, produzindo tensão elétrica entre dois materiais.

De acordo com (CHEN, 2005 Apud CHENXI, 2015), atualmente, os dispositivos termoelétricos de ponta são à base de telureto de bismuto (Bi_2Te_3) por apresentar um ótimo valor de figura de mérito (Z), ou seja, sua capacidade de transformar energia térmica em energia elétrica em temperatura ambiente.

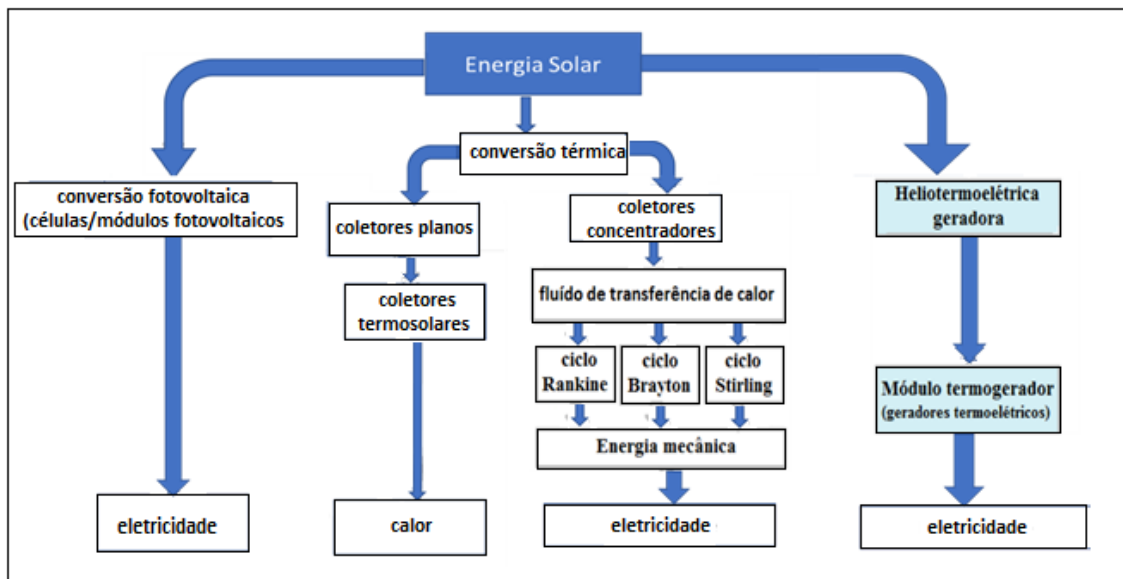
De acordo com Dabhi (2015), o bismuto tem sido utilizado no processo de fabricação de ligas como o telúrio de bismuto (Bi_2Te_3), telureto de chumbo (PbTe), sulfeto de bismuto (Bi_2S_3), telureto de estanho (Sb_2Te_3), telureto de germânio (GeTe), entre outras ligas, utilizados na produção de módulos termoelétricos.

2.1 Estado da Arte sobre Geração Heliotérmica

Das tecnologias heliotérmicas existentes para usar o Sol como fonte de energia elétrica, a tecnologia fotovoltaica é a mais comum atualmente, porém a tecnologia de concentração solar (CSP) vem ganhando espaço em vários países. A principal diferença é que a tecnologia fotovoltaica consiste em utilizar a luz solar direta para geração de eletricidade, já a tecnologia de concentração solar (CSP) consiste em utilizar a luz solar concentrada para gerar vapor d'água e em seguida gerar energia elétrica através do ciclo termodinâmico.

Conforme mostrado na Figura 1, a conversão da energia solar em eletricidade, além de calor, se dá por diferentes rotas, tais como a fotovoltaica, a térmica e a heliotermoelétrica, objeto desse trabalho.

Figura 1 - - Conversão da energia solar em energia elétrica



Fonte: Próprio autor (2019)

A conversão térmica convencional para geração de eletricidade, tal como ocorre na rota coletores concentradores, pode ser utilizada através de ciclos termodinâmicos por transferência de calor em ciclos do tipo Rankine, Brayton e Stirling.

A conversão térmica em um ciclo Rankine, segundo (Almeida, 2011 apud Moran, 2006), utiliza uma turbina a vapor onde o ciclo termodinâmico tendo água como fluido, ao superaquecer, expande suas moléculas e transforma em vapor d'água, movendo um ou mais cilindros até atingir seu ponto máximo superior, que por sua vez ao ser resfriado a água, comprimindo suas moléculas, atinge o ponto máximo inferior, produzindo trabalho.

A conversão térmica em um ciclo Brayton, segundo (Scarpin, 2016 apud Çengel, 2013), utiliza uma turbina a gás. O gás passa pelo compressor sob uma determinada razão de compressão elevando significativamente a pressão do gás, que, ao passar por um trocador de calor a alta temperatura, eleva a temperatura do gás. Em seguida, o gás sofre uma expansão, gerando potência de eixo. Por fim, o fluido passa por um trocador de calor a baixa temperatura, rejeitando o calor para o ambiente, repetindo o ciclo.

A conversão térmica em um ciclo Stirling, segundo Barros (2005), utiliza um motor de combustão externa, podendo ser do tipo Alfa, Gama e Beta. O motor Stirling

funciona em um ciclo termodinâmico que ocorre dentro de um pistão em 2 tempos, ou seja, o pistão atinge seu ponto máximo superior e seu ponto máximo inferior em um processo de compressão isotérmica, ou seja, aquecimento dos gases a um volume e temperatura constante, e expansão isotérmica, ou seja, resfriamento dos gases a um volume e temperatura constante (LUNAZZI, 2008).

Na rota da conversão fotovoltaica, segundo Imhoff (2007), definida como energia gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade ocorre por meio de um dispositivo conhecido como célula fotovoltaica. Segundo Severino e Oliveira (2010), o efeito fotovoltaico é gerado através da absorção dos fótons contidos na luz solar, que ocasiona uma diferença de potencial na estrutura do material semiconductor, produzindo um fluxo de elétrons. Este fluxo só é possível quando houver luz solar.

Já a rota de conversão heliotermoelétrica, objeto deste trabalho, é uma junção da termoeletricidade com a tecnologia heliotérmica, que converte de forma direta a radiação solar em eletricidade utilizando refrigeradores termoelétricos (TEC) através do princípio de Seebeck. Os raios solares refletidos pela calha refletora, revestida por vidros espelhados, são direcionados e concentrados para um dos lados dos refrigeradores termoelétricos, interligados entre si e alinhados na altura do foco do concentrador solar, enquanto o outro lado dos refrigeradores termoelétricos são resfriados por um sistema de refrigeração, provocando um gradiente de temperatura entre ambas as faces dos módulos termogeradores.

Atualmente existem quatro famílias de tecnologia de energia heliotérmica denominada de família (CSP) Concentrated Solar Power, citadas abaixo.

- Cilíndrico-parabólico;
- CLFR (Compact Linear Fresnel Reflector);
- Torre central;
- Disco parabólico.

Essas tecnologias são categorizadas de acordo com o foco da radiação solar, bem como o tipo de receptor. As características de desempenho de cada tecnologia

possuem distinções de acordo com o foco e o formato do coletor, sendo a concentração dos raios solares obtida com as diferentes tecnologias de coletores solares, atingindo diferentes índices de temperaturas no foco conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Características de desempenho da tecnologia CSP

Motora	Tipo de tecnologia	Tipo de foco	Faixa de Temperatura (°C)
Rastreamento em 1 eixo	Refletor Linear Fresnel (RLF)	Linear	60 a 250
	Cilíndrico-parabólico	Linear	60 a 400
Rastreamento em 2 eixos	Disco parabólico	Pontual	100 a 1.500
	Torre central	Pontual	150 a 2.000

Fonte: Adaptado de Kalogirou (2009)

2.2 Família de Concentradores Heliotérmicos

Por ser um desenvolvimento recente, em fase de amadurecimento, empregado na geração de energia elétrica, nenhuma das quatro tecnologias Concentrated Solar Power (CSP) descritas abaixo ainda se consolidou como padrão definitivo de usinas heliotérmicas, porém, em capacidade instalada no mundo até o momento, as plantas solares com tecnologia CSP cilíndrico-parabólica predominam (BAHAROON et al, 2015).

A diferença estrutural de cada tecnologia está na geometria com que são projetadas, suas estruturas de sustentação, tipos de materiais utilizados para refletir e concentrar os raios solares, o tipo de planta solar projetada para cada tecnologia e suas configurações de arranjo, entre outras. A seguir serão apresentadas as quatro famílias CSP existentes.

2.2.1 Concentradores Fresnel Linear

De acordo com Kalogirou (2009), a forma do Refletor Linear Fresnel (RLF) se aproxima da forma do sistema cilíndrico-parabólico. O campo que compõe a área do coletor solar é composto de várias fileiras de coletores com espelhos planos denominados de heliostatos.

O Refletor Linear Fresnel associado ao ciclo Rankine pode ter diferentes arranjos: os espelhos podem ser alinhados como uma parábola. Um arranjo possível é a

disposição dos espelhos no chão, sendo que a luz solar concentrada é direcionada para o tubo absorvedor linear (receptor), fixado em uma torre. A geração de vapor ocorre diretamente no receptor onde circula o fluido de trabalho. O fluido vaporizado aciona uma turbina a vapor que por sua vez aciona um gerador acoplado a turbina, convertendo energia mecânica em energia elétrica e segue para unidade consumidora utilizando linha de transmissão de energia elétrica. Uma desvantagem do refletor linear Fresnel é o cuidado necessário no projeto para evitar que um espelho cause sombra em outro, aumentando o tamanho da área a ser ocupada pela planta.

Figura 2 – Concentrador Fresnel Linear



Fonte: Qingdao Migo Glass (2018)

2.2.2 Concentradores Cilíndrico-parabólico

Segundo (CRESESB, 2009 apud KALOGIROU, 2009), o concentrador solar cilíndrico-parabólico, associado ao ciclo Rankine, consiste basicamente em uma superfície refletora com geometria parabólica composta por espelhos montados sobre uma estrutura metálica e um tubo absorvedor posicionado longitudinalmente na linha focal. Quando a superfície é direcionada para o Sol, a radiação é refletida pela superfície e concentrada no absorvedor.

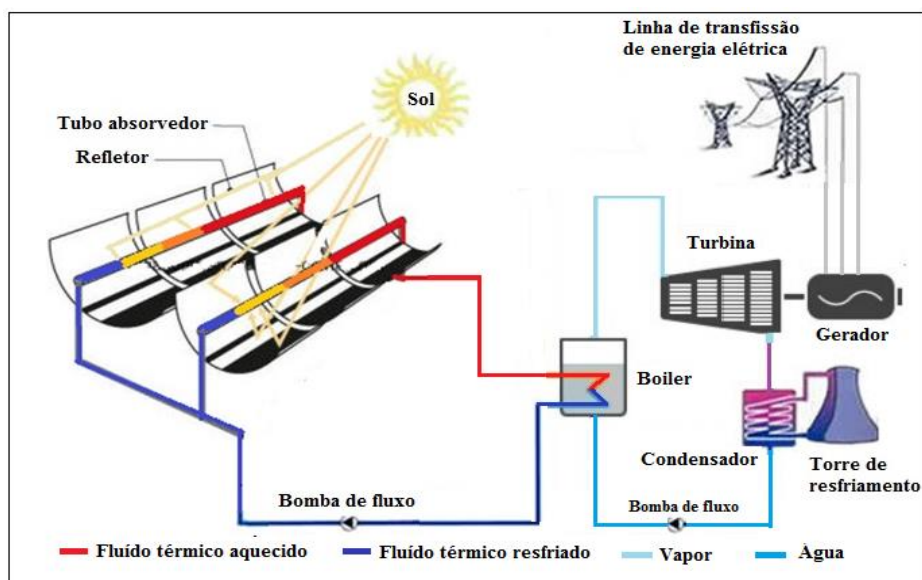
Figura 3 – Concentrador Cilíndrico-parabólico



Fonte: CRESESB (2012)

Segundo DGS (2010), o sistema de concentradores cilíndrico-parabólico é composto por fileiras paralelas de espelhos côncavos, no formato parabólico, fazendo com que os raios solares concentrem o calor numa área reduzida, com grande aumento da intensidade energética e conseqüentemente do calor, alcançando temperaturas de até 400 °C. Com a temperatura elevada, o fluido de trabalho, pertencente ao sistema primário, ao superaquecer vaporiza a água no interior do boiler, que pertence ao sistema secundário e retorna para o sistema, repetindo o ciclo. O vapor d'água aciona uma turbina de ciclo Rankine acoplada a um gerador produzindo energia elétrica. O vapor d'água ao retornar para o boiler passa por um condensador onde é resfriado, repetindo o ciclo. A energia elétrica gerada segue para linhas de transmissão de energia elétrica, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Esquema básico da conversão heliotérmica em eletricidade



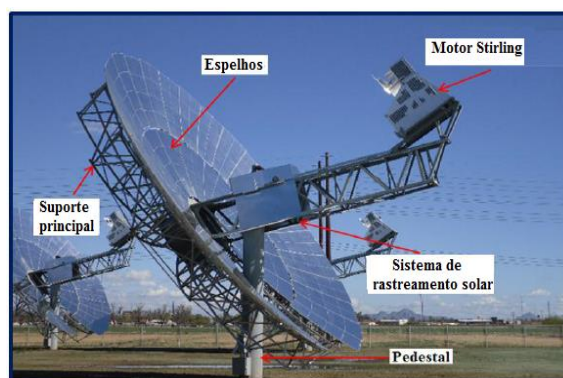
Fonte: Adaptado de DGS (2010)

2.2.3 Concentradores Disco Parabólico

Segundo malagueta (2015), o disco parabólico reflete toda energia solar recebida para o receptor de foco pontual, onde se localiza um motor denominado Stirling. Este motor é de combustão externa de ciclo fechado, isto é, a potência gerada é oriunda do processo de aquecimento e resfriamento da superfície externa do (s) cilindros (s), proporcionando consideráveis gradientes de temperatura no gás de trabalho (BARROS, 2005).

O disco parabólico possui um sistema de rastreamento solar em dois eixos, o que permite maiores taxas de concentração, atingindo temperaturas de até 1500 °C. A tecnologia disco parabólico pode operar de forma independente ou como parte de uma planta composta por vários discos, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Concentrador Disco Parabólico

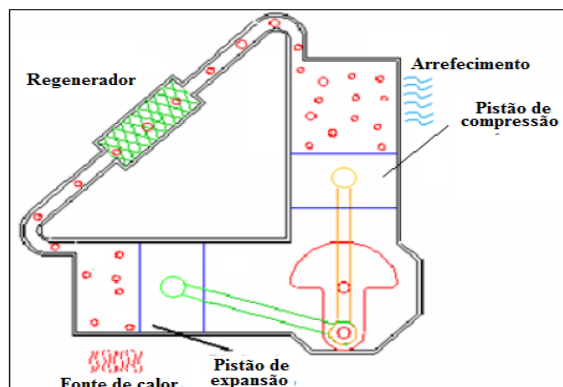


Fonte: Castellanos (2012)

Segundo Malagueta (2015), o calor produzido devido a concentração dos raios solares é direcionado para o motor Stirling que por sua vez é transferido para o fluido de trabalho que aciona o motor de combustão externa de ciclo Stirling. Acoplado ao motor está um gerador de energia elétrica, que converte a energia mecânica em energia elétrica. Este tipo de motor possui basicamente duas câmaras onde um pistão (êmbolo) se move em quatro estágios no interior da câmara. Durante os estágios no interior da câmara o gás passa por alteração de temperatura a um volume constante, provocando a compressão, aquecimento, expansão e arrefecimento, onde o calor é rejeitado, gerando trabalho mecânico. Durante este processo o gás de trabalho passa por um regenerador, onde passando pelo espaço de expansão, sendo aquecido pela fonte externa, aumentando a pressão, onde o pistão de compressão se movimenta até o ponto morto

inferior, enquanto o pistão de expansão se movimenta para cima. Com isso o gás de trabalho passa para o espaço de compressão, tendo o calor rejeitado pelo sistema de resfriamento, reduzindo a pressão, conforme mostrado na Figura 6.

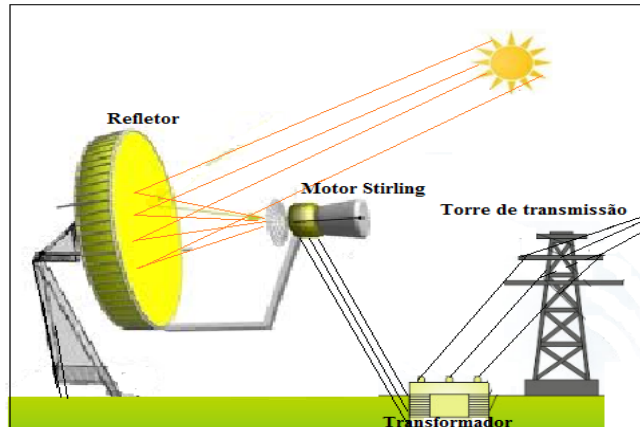
Figura 6 – Esquema básico de motor Stirling tipo Alfa



Fonte: Satiro (2012)

A Figura 7 a seguir exemplifica de forma genérica o processo de conversão da energia solar concentrada em energia elétrica utilizando a tecnologia do motor Stirling.

Figura 7 - Esboço simplificado da conversão heliotérmica em eletricidade



Fonte: Adaptado de Weer (2020)

2.2.4 Torre de Concentração

Segundo Kalogirou (2009), a torre solar de concentração solar associada ao ciclo Rankine utiliza espelhos planos de grande dimensão denominados heliostatos, que ficam posicionados no solo. Os Heliostatos rastreiam o Sol individualmente através de um sistema de rastreamento comandado remotamente por meio de programas computacionais refletindo a radiação solar para o receptor de foco pontual, fixado e

posicionado no topo da torre central. A torre de concentração possui a vantagem de dispor de uma planta com a configuração de vários discos parabólicos em volta da torre central, permitindo receber maiores taxa de concentração dos raios solares, conforme ilustra a Figura 8.

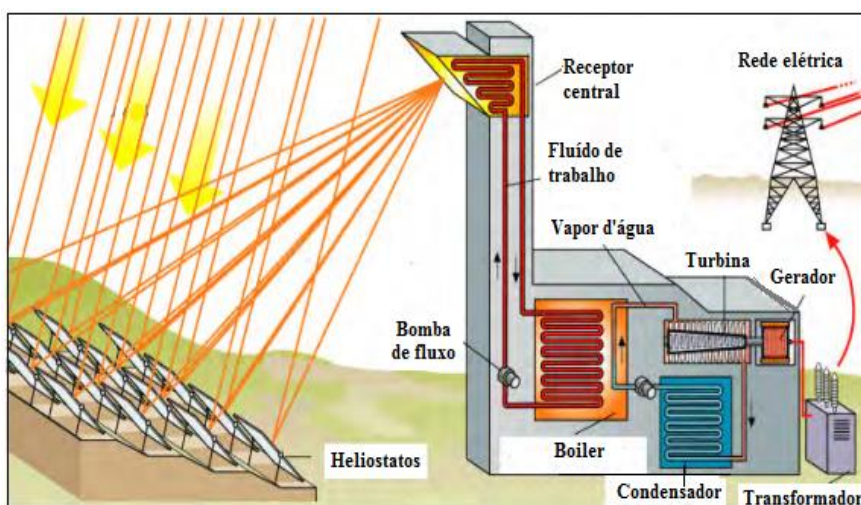
Figura 8 – Torre de Concentração (Espanha)



Fonte: Remann (2016)

Segundo (LODY, 2012 apud RICHTER, 2009), a energia térmica gerada pelos raios solares é absorvida pelo receptor e transferida para um sistema primário contendo um fluido de trabalho que ao superaquecer vaporiza a água no interior de um boiler e retorna para o sistema, repetindo o ciclo. O vapor d'água, pertencente ao sistema secundário, aciona uma turbina de ciclo Rankine acoplada a um gerador, produzindo energia elétrica. O vapor d'água ao retornar para o boiler passa por um condensador onde é resfriado, repetindo o ciclo. A tecnologia Torre de Concentração atinge temperaturas que variam entre 800 °C a 1000 °C.

Figura 9 – Esquema simplificado da tecnologia Torre de concentração



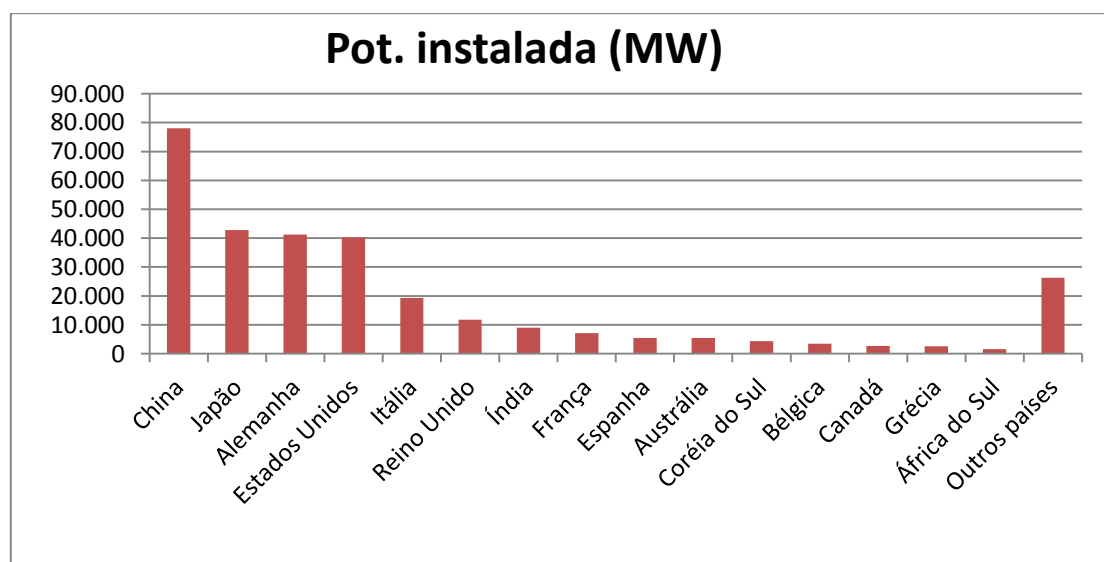
Fonte: Bertin (2017)

Usinas de energia solar com tecnologia CSP de concentração estão em constante crescimento no mundo. De acordo com a SBC Energy Institute (2013), as perspectivas futuras com a geração de energia elétrica oriunda de fontes heliotérmicas são promissoras.

2.3 Cenário Geral Sobre o Uso da Energia Heliotérmica no Mundo

De acordo com o departamento de informações e estudos energéticos do MME (2017), em 2016, o mundo contava com uma potência instalada solar de 301GW, sendo 294 GW (97,7%) oriundas de painéis fotovoltaicos (FV) e 7GW (2,3%) provenientes de concentração solar (CSP). O Gráfico 1 mostra os países mais ranqueados.

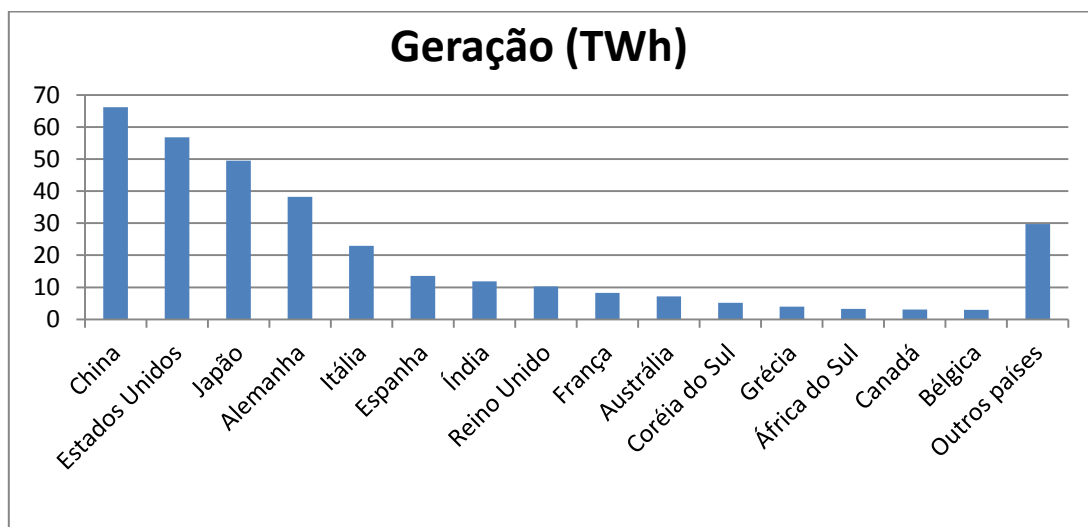
Gráfico 1 - Potência instalada solar em 2016



Fonte: Adaptado de MME (2017)

Ainda segundo o departamento de informações e estudos energéticos do MME (2017), a geração total de energia elétrica oriunda de painéis fotovoltaicos e sistemas de concentração solar pelos países citados acima representa uma capacidade de geração de 333 TWh, conforme mostra o Gráfico 2.

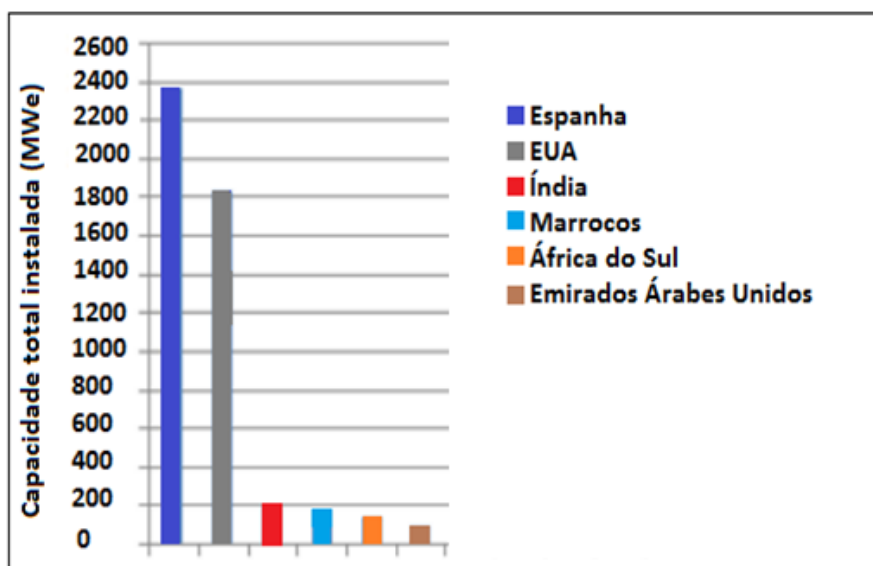
Gráfico 2 - Geração e potência instalada solar em 2016



Fonte: Adaptado de MME (2017)

De acordo com (BERTIN, 2017 apud CSP, 2016), até 2015 a potência nominal no mundo era de aproximadamente 4,9 mil MWe, tendo a Espanha e Estados Unidos com o maior potencial, seguidos de Índia, Marrocos, África do Sul e Emirados Árabes Unidos, conforme mostra o Gráfico 3.

Gráfico 3 – Capacidade total instalada por país



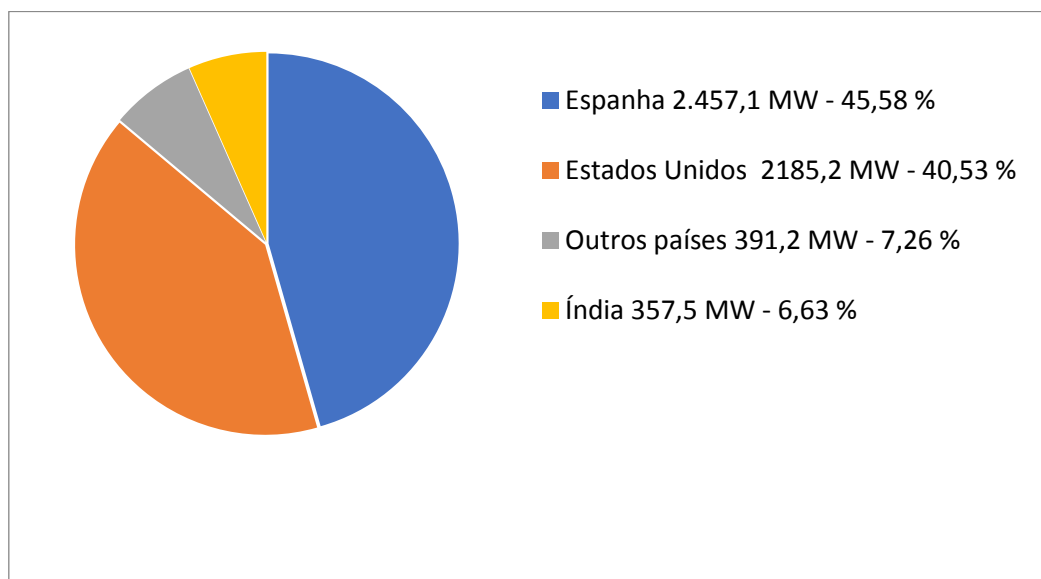
Fonte: Adaptado de Bertin (2017)

De acordo com (CARVALHO, 2016 apud GIZ, 2014), encontra-se em diversas partes do mundo em operação, construção ou em fase de desenvolvimento 5298 usinas

heliotérmicas com tecnologia CSP, sendo que 4245 dessas usinas utilizam tecnologia cilíndrico-parabólico.

Segundo Brancalião (2015), atualmente existem pouco mais de 100 plantas com tecnologia CSP em operação distribuída em diversas partes do mundo. A capacidade instalada varia, assim como a tecnologia empregada. O Gráfico 4 mostra a participação de cada país, de acordo com sua capacidade de operação.

Gráfico 4 – Tecnologia CSP em operação no mundo



Fonte: Brancalião (2015)

Segundo Brancalião (2015), os outros países representados no Gráfico 4 se tratam da África do Sul, Alemanha, Argélia, Austrália, Canadá, Chile, China, Egito, Emirados Árabes Unidos, França, Israel, Marrocos, Tailândia e Turquia.

De acordo com o site Ambiente Energia (2015), em parceria público-privada ou iniciativa própria, as usinas heliotérmicas estão sendo implantadas cada vez mais no mundo como fonte alternativa segura, viável e politicamente correta para gerar energia elétrica de forma descentralizada.

Localizada na cidade italiana de San Nicolò d'Arcidano, na região da Sardenha, uma fazenda de leite instalou em 2015 uma usina heliotérmica com tecnologia Fresnel que conta com uma área espelhada total de 995 m² e pico de potência instalada de 470 KW. A planta é formada por 34 módulos de concentração solar dispostos em duas linhas. Cada módulo possui superfície total de 29 m², onde o propósito é deixar de utilizar 50 mil litros de combustível e deixar de emitir 180 toneladas de CO₂ na atmosfera, conforme mostra a Figura 10.

Figura 10 – Usina heliotérmica de San Nicolò de d’Arcidano (Itália)



Fonte: Ambiente Energia (2015)

Segundo o portal G1 outro exemplo recente é a usina heliotérmica de Ashalim, localizada no deserto de Negev, no Sul de Israel, conforme mostra a Figura 11. A usina com tecnologia Torre de concentração possui uma torre central com 250 m de altura, contendo 50.600 heliostatos ao redor da torre controlados por computador em uma área de 3 Km² e produzirá 121 megawatts de energia solar, suficientes para iluminar 125 mil casas, evitando a emissão anual de 110 mil toneladas de dióxido de carbono na atmosfera.

Figura 11 – Usina heliotérmica Ashalim (Israel)



Fonte: G1 (2017)

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Termoeletricidade

Os efeitos térmicos e elétricos são detectados em um circuito composto por materiais semicondutores mantidos a um gradiente de temperatura. Estes efeitos, denominados de efeito Seebeck e efeito Peltier, consistem na conversão direta de energia térmica em energia elétrica e vice-versa (BOTAN, 2014). Segundo Audiffred (2015), o efeito termoelétrico foi primeiramente observado em metais entre o período de 1820 e 1830, mas se mostrou interessante apenas mais tarde, por volta do ano de 1950, com o advento de materiais semicondutores dopados, atingindo uma eficiência muito maior. De acordo com Fernandes (2012), Thomas Seebeck, em 1823, notou que uma junção composta por dois materiais condutores sujeitos a uma variação de temperatura e ligados aos terminais de um galvanômetro, ocorreria o surgimento de uma diferença de potencial. A esse conjunto de elementos ligados e sujeitos a uma variação de temperatura foi dado o nome de Termopar. Treze anos mais tarde, o francês Jean Charles Athanase Peltier verificou o efeito contrário ao de Seebeck, utilizando uma montagem idêntica, invertendo o procedimento, onde foi aplicada uma corrente elétrica na extremidade da junção dos dois materiais e verificou que o termopar sofria uma variação de temperatura.

Este capítulo apresenta uma breve descrição dos fenômenos físicos da conversão termoelétrica direta, as características dos geradores termoelétricos (TEG), suas aplicações comerciais e a utilização dos geradores no sistema concentrador heliotermoelétrico, proposto neste trabalho.

3.1.1 Efeito Peltier

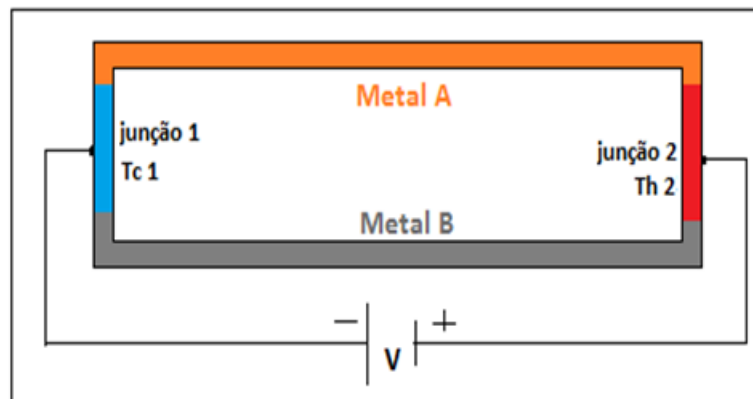
De acordo com Oliveira (2014), O efeito Peltier, consiste no surgimento de um gradiente de temperatura quando uma corrente elétrica flui na junção de dois materiais semicondutores de propriedades diferentes. Segundo Beng (2011), o efeito Peltier ocorre em uma relação entre a quantidade de calor liberado pelo material e a intensidade da corrente elétrica aplicada no material, definido como coeficiente Peltier, sendo expresso pela equação (3.1)

$$\pi = \frac{Q}{I_{ab}} \quad (3.1)$$

onde: (I_{ab}) é a corrente sendo deslocado do ponto a para o ponto b, e (Q) é a quantidade de calor liberado para o ambiente.

De acordo com Fernandes (2012), o efeito Peltier resulta de uma alteração de entropia das cargas de maior energia dos elétrons que se movimentam através da junção com temperatura mais quente (T_h) para a junção com temperatura mais baixa (T_c) de um material semiconductor de propriedades diferentes, conforme a Figura 12.

Figura 12 – Efeito Peltier

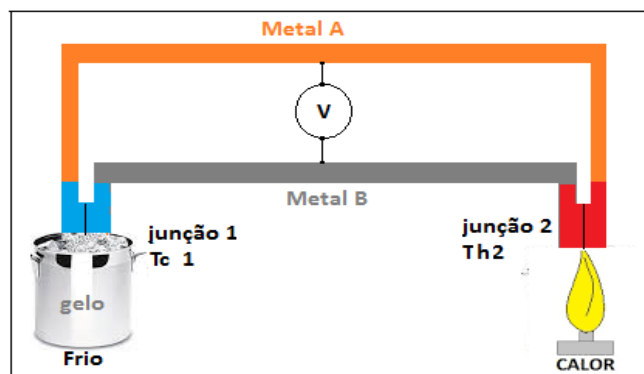


Fonte: Própria autoria (2020)

3.1.2 Efeito Seebeck

De acordo com Oliveira (2014), o efeito Seebeck, consiste na produção de uma diferença de potencial elétrico entre duas junções de semicondutores de materiais diferentes quando estas são submetidas a diferentes temperaturas. Como representado na Figura 13, a junção do circuito formado por dois metais de propriedades diferentes, (A e B), são mantidas em temperaturas distintas e uma tensão surge nos terminais do circuito.

Figura 13 – Efeito Seebeck



Fonte: Próprio autor (2020)

Segundo Torres (2018), a presença de um gradiente de temperatura faz com que os portadores de carga presentes no material apresentem uma tendência a sair da região mais quente, onde os elétrons têm maior energia cinética, se deslocando para a região mais fria, o que ocasiona o surgimento de tensão elétrica que é expressa na equação (3.2)

$$V = \alpha_{pn} \cdot (T_h - T_c) \quad (3.2)$$

onde (α_p) é o coeficiente de Seebeck de materiais do tipo p, (α_n) é o coeficiente de Seebeck de materiais do tipo n, (T_h) é a temperatura quente e (T_c) é a temperatura fria, sendo estas medidas em Kelvin.

O coeficiente de Seebeck é uma propriedade que cada material termoelétrico possui e pode ser expresso da maneira apresentada na equação (3.3)

(3.3)

$$\alpha_{pn} = \left(\frac{V}{T_h - T_c} \right)$$

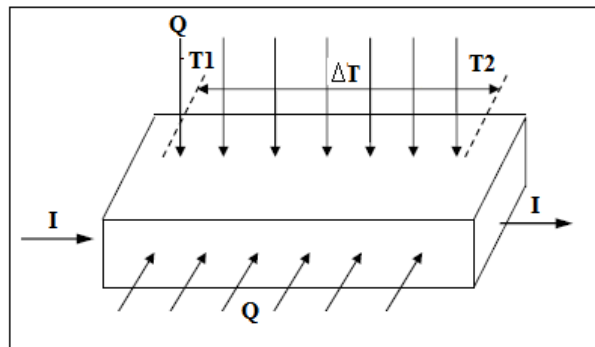
onde (V) é a tensão elétrica gerada, (T_h) é a temperatura quente e (T_c) é a temperatura fria. O coeficiente de Seebeck é quase linear e pode assumir valores positivos ou negativos, dependendo do sentido do fluxo da corrente elétrica, quando uma tensão é gerada. O coeficiente de Seebeck é medido em volts por Kelvin (V/K) ou em micro volts por Kelvin ($\mu\text{V/K}$) dependendo da intensidade da tensão elétrica. O valor e sinal deste coeficiente são explicados pela assimetria da distribuição de elétrons em torno do

nível de Fermi, para metais, ligas metálicas, outros materiais e semicondutores. Dentro dos semicondutores, a concentração de portadores ótimos, pode ser controlada com precisão para maximizar o efeito Seebeck.

3.1.3 Efeito Thomson

Segundo (AUDIFFRED, 2015, Apud FERNANDES, 2012), em 1855, Thomson verificou uma relação entre o coeficiente de Peltier e Seebeck onde observou um efeito denominado de efeito Thomson. O efeito relaciona a quantidade de calor (Q) gerado num condutor, quando há uma corrente eléctrica e o surgimento simultaneamente de uma diferença de temperatura ΔT , ou seja, a transferência de calor é proporcional à corrente eléctrica e diferença de temperatura, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 – Efeito Thomson



Fonte: Beng (2011)

As relações entre os efeitos Peltier e Seebeck são analisadas por Thomson (1822) através de uma descrição simples e precisa da termoeletricidade. Ainda Segundo (AUDIFFRED, 2015, Apud FERNANDES, 2012) o coeficiente de Peltier está relacionado ao coeficiente de Seebeck pela equação (3.5)

$$\pi = \alpha_{pn} \cdot T \quad (3.4)$$

e o coeficiente de Thomson está relacionado ao coeficiente de Seebeck pela equação (3.5)

$$\tau = \tau \frac{d\alpha}{dT} \quad (3.5)$$

onde (T) é a temperatura absoluta.

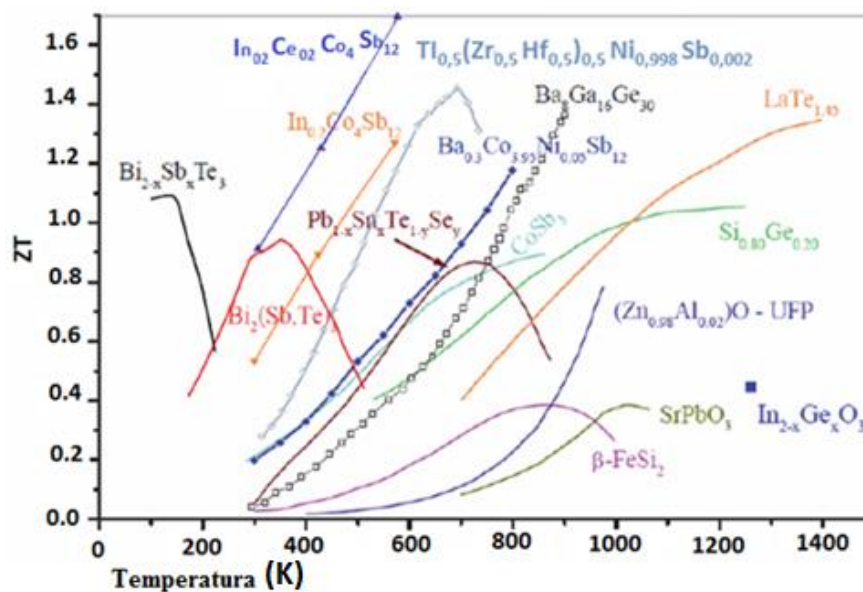
3.2 Figura de Mérito

Segundo Gonçalves (2008), a origem da figura de mérito (Z) se deu no estudo teórico conduzido por Edmund Altenkirch, entre 1909 e 1911, que mostrou que os parâmetros mais importantes na comparação entre vários materiais termoelétricos eram o coeficiente de Seebeck, condutividade térmica e condutividade elétrica, que é utilizada para calcular a figura de mérito. De acordo com (Bangert, 2006), a figura de mérito pode ser definida como a medida da capacidade dos materiais termoelétricos de transformar energia térmica em energia elétrica a uma determinada temperatura, relacionando o coeficiente de Seebeck (α), a resistividade elétrica (ρ), e a condutividade térmica (K), sendo expressa de acordo com a equação (3.6)

$$Z = \frac{\alpha^2 p n^2}{\rho K} \quad (3.6)$$

Em geral, o aumento da condutividade elétrica leva ao aumento da condutividade térmica, dificultando a otimização da figura de mérito. O gráfico 5 mostra os melhores valores de figura de mérito (Z) em função da temperatura para materiais do tipo n, ou seja, condutores contendo excesso de um elétron em sua camada de valência.

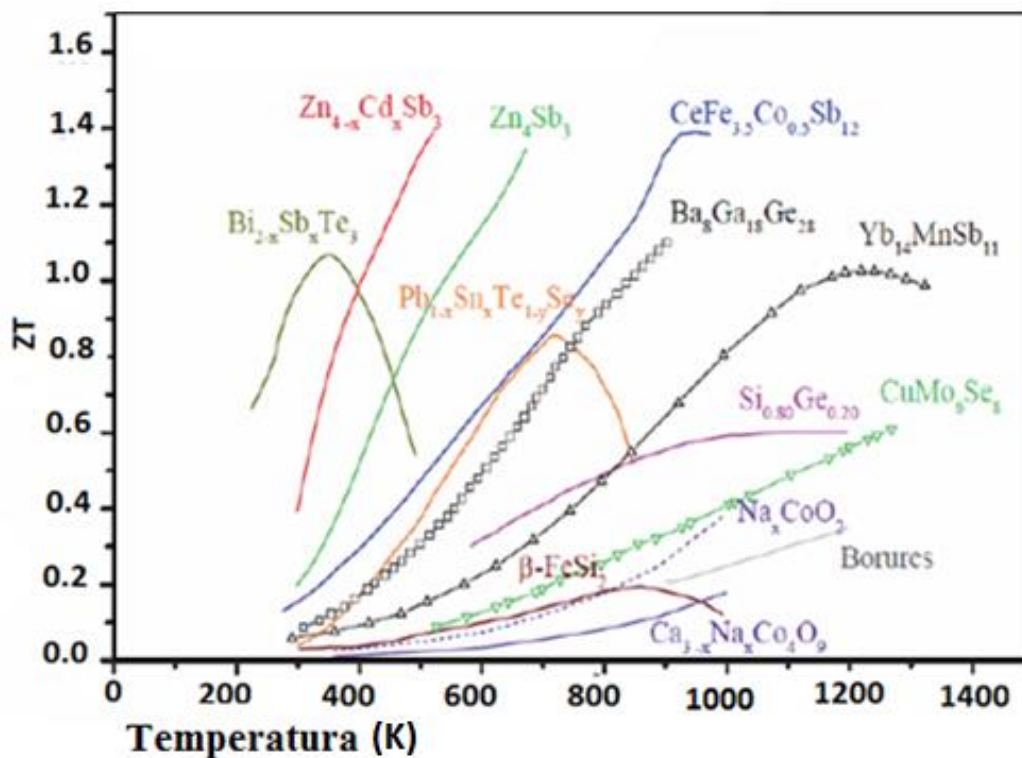
Gráfico 5 – Figura de mérito de materiais tipo n



Fonte: Godart (2008)

Do ponto de vista termoelétrico, um material é considerado bom se o mesmo apresenta um alto coeficiente de Seebeck com condutividade térmica e resistividade elétrica baixa. No entanto, geralmente materiais de baixa resistividade elétrica apresentam alta condutividade térmica, sendo difícil encontrar num mesmo material essas três características. É comum observar em diferentes materiais, valores de número de mérito inferiores à unidade, sendo considerados bons materiais termoelétricos aqueles com número de mérito a partir de uma unidade. Apenas os materiais que possuem $Z > 0,5$ são geralmente considerados como materiais termoelétricos (AUDIFFRED, 2015). O Gráfico 6 mostra os melhores valores de figura de mérito (Z) em função da temperatura para materiais do tipo p, ou seja, átomos com a deficiência de um elétron.

Gráfico 6 – Figura de mérito de materiais tipo p



Fonte: Godart (2008)

Um dos materiais mais utilizados em dispositivos termoelétricos é uma liga feita a partir de bismuto e telúrio (Bi_2Te_3), uma vez que provou ser bastante versátil quer no efeito de Peltier (arrefecimento/aquecimento) quer no efeito de Seebeck (geração de energia elétrica).

Tabela 2 – Propriedades termoelétricas de alguns materiais e ligas

Material	Símbolo	Coefficiente Seebeck (α)	Resistividade (ρ)	Condutividade de térmica (K)	figura de mérito (Z) a (300 °K)
Níquel	Ni	-18	0,07	91	0,015
Cromo	Cr	18	0,13	94	0,008
Bismuto	Bi	-60	1,15	8,4	0,11
Antimônico	Sb	40	0,42	18,5	0,062
Telureto de bismuto (tipo n)	Bi_2Te_3	-240	10	2,02	0,86
Telureto de antimônio	Sb_2Te_3	92	3,23	1,63	0,48

Fonte: Fernandes (2012)

3.3 Geradores Termoelétricos

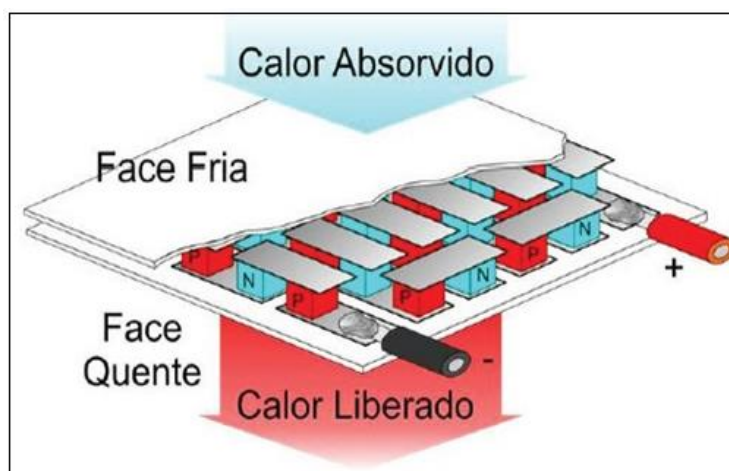
Segundo Pintado (2008), geradores termoelétricos (TEG), do inglês thermoelectric generator, podem operar tanto segundo o efeito Peltier, quanto o efeito Seebeck, sendo utilizados para aplicações em refrigeração ou aquecimento. Já os refrigeradores termoelétricos, conhecidos pela sigla TEC, do inglês thermoelectric cooler, podem ser usados apenas em refrigeração. As células que operam pelo efeito Seebeck são utilizadas para gerar corrente elétrica, por isso são denominadas de geradores termoelétricos.

Para (SINGH et al, 2012) os elementos térmicos em um gerador termoelétrico (TEG) consistem de semicondutores do tipo n e tipo p, e conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo. A potência de saída e o desempenho do TEG não dependem apenas das propriedades do material, mas também a estrutura geométrica. Com os recentes desenvolvimentos de novas tecnologias, a integração dos mesmos promete uma forma sustentável de gerar eletricidade a partir da energia solar concentrada.

Segundo (AUDIFFRED, 2015, Apud SOUZA, 2007), quando uma corrente contínua passa por pares de elementos de tipo-n para o tipo-p, a temperatura da junta fria é reduzida, resultando assim em uma absorção do calor do ambiente. Este calor é transferido pela placa por transporte de elétrons e emitido no lado quente por meio de elétrons que se movem de um estado de alta energia para um estado de baixa energia. Ao inverter o sentido da corrente esse processo também é invertido. Desta forma, o lado que estava quente passa a ser refrigerado, enquanto que o lado que estava sendo

refrigerado passa então a ser aquecido. A Figura 15 mostra a estrutura elementar de um refrigerador termoelétrico.

Figura 15 – Estrutura do refrigerador termoelétrico (TEC)



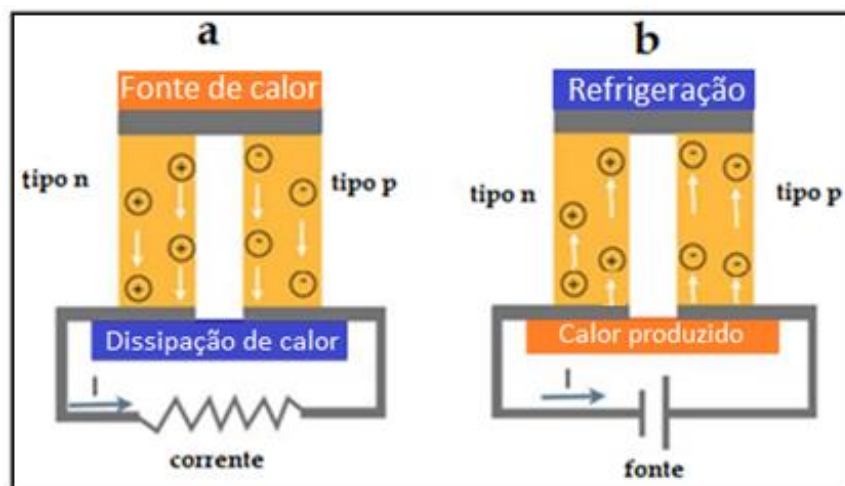
Fonte: Adaptado de UNIVASF (2018)

Como alternativa viável, geradores termoelétricos (TEG) podem ser usados para geração de energia elétrica utilizando a tecnologia (CSP) Concentrated Solar Power. Segundo Beng (2011), os dispositivos utilizados para geração de eletricidade a partir da energia térmica concentrada consistem em dois componentes básicos. O primeiro é o coletor solar, que captura a radiação solar na forma de energia térmica. O segundo componente é o elemento termoelétrico, que usa a energia térmica concentrada para aquecer sua junção e gerar uma tensão que permite a passagem de corrente elétrica em um circuito de carga.

Neste contexto, o concentrador solar cilíndrico-parabólico pode ser utilizado concentrando a energia solar em um dos lados dos módulos termoelétricos e resfriando o lado oposto através de um sistema de refrigeração, aumentando assim o gradiente de temperatura entre ambos os lados, transformando o calor em eletricidade, tornando o sistema de concentração helio-termoelétrico de efeito Seebeck proposto nesta dissertação em um projeto viável.

A Figura 16 ilustra o esquema de um dispositivo termoelétrico básico constituído por dois materiais, sendo um do tipo p, ou seja, átomos com déficit de um elétron em sua camada de valência e outro do tipo n, ou seja, átomos contendo excesso de um elétron em sua camada de valência. Ambos os semicondutores são conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo.

Figura 16 – Esquema simplificado de um dispositivo termoeétrico



Fonte: adaptado de Guerra (2017)

De acordo com Guerra (2017), quando um gradiente de temperatura é aplicado ao dispositivo (a), a diferença nas distribuições de velocidade dos portadores de carga no lado quente e frio produz uma diferença de potencial e uma corrente elétrica associada. Isto retrata o princípio básico para a geração de energia por termoeletricidade. Se uma fonte de corrente externa é aplicada a um dispositivo com o mesmo layout (b), ocorre um resfriamento ou aquecimento seletivo, dependendo da direção do fluxo dos portadores de carga, demonstrando o modo básico de operação de um refrigerador Peltier. Ainda de acordo com Guerra, a origem para o surgimento da diferença de potencial é a diferença de energia e , portanto, a distribuição de velocidade dos portadores de carga, levando a um fluxo de cargas do lado quente para o lado frio do material. Assim, o coeficiente de Seebeck (α) depende do tipo de portador de carga majoritário, sendo positivo para o material do tipo **p** e negativo para o material do tipo **n**.

3.3.1 Elementos Químicos Utilizados em Geradores Termoeétricos

Cada material semiconductor tem sua estrutura de banda específica, com parâmetros específicos como, por exemplo, de banda proibida (Gap de energia), massa efetiva e estrutura direta ou indireta. Assim, o objetivo é selecionar um número alto de materiais com Figura de mérito que tenham fatores de compatibilidade semelhantes. A compatibilidade é mais importante para os geradores segmentados porque as propriedades do material termoeétrico podem mudar drasticamente de um segmento para outro.

Ligas baseadas em bismuto, em combinações com antimônio, telúrio e selênio, são chamadas de materiais de baixa temperatura e podem ser utilizados em temperaturas de aproximadamente 177 °C. Estes materiais são universalmente empregados na refrigeração termoelétrica e não têm concorrentes para aplicações sobre este regime de temperatura. O regime de temperaturas de aproximadamente 577 °C é para materiais à base de telureto de chumbo, enquanto os termoelementos empregados em temperaturas mais elevadas são fabricados a partir de ligas de germânio e operam até 1027 °C (GORNI, 2011).

O bismuto e o telúrio são elementos fundamentais na composição da liga telureto de bismuto, amplamente utilizada em geradores termoelétricos. Para aplicações em temperatura próxima a temperatura ambiente tais como refrigeração e conversão de calor residual em energia elétrica, as ligas de telureto de bismuto (Bi_2Te_3) tem mostrado possuir a maior figura de mérito tanto para sistemas termoelétricos do tipo **n** quanto para tipo **p** (SNYDER, 2008).

Segundo (ALVES, 2006 Apud BERJERO, 2006), os primeiros registros sobre o bismuto datam da época de 1556, onde se acreditava que o metal era resultante do chumbo (Pb) e estanho (Sn). Só em 1753, Claude Geoffroy provou que o bismuto não era derivado do chumbo e sim de um elemento metálico distinto. Segundo Gorni (2011), o bismuto (Bi) é um elemento caro, pouco abundante e encontrado na natureza na forma de sulfeto (Bi_2S_3) ou de óxido (Bi_2O_3), o bismuto dentre outras aplicações, é empregado em ligas especiais que fundem a baixas temperaturas. Pertencente ao grupo 5a da tabela de classificação periódica cristaliza-se facilmente e dilata-se quando solidifica como a água ou o antimônio. De todos os metais, o bismuto é o mais diamagnético e o de menor condutibilidade térmica depois do mercúrio, estando associado a minérios de vários metais com Prata (Ag), Cobalto (Co), Chumbo (Pb), Zinco (Zn) e Estanho (Sn). Ainda segundo Gorni (2011), o bismuto combina com outros elementos formando sulfetos, dentre os quais os mais importantes são a bismutinita (Bi_2S_3), a bismutita, que é um carbonato básico de composição variável, e a bismita (Bi_2O_3). A maior parte do bismuto produzido no mundo é utilizada em produtos farmacêuticos, na fabricação de termopares e ligas utilizados em geradores termoelétricos. A Figura 17 mostra um cristal elementar de bismuto.

Figura 17 – Cristal elementar de bismuto



Fonte: Beng (2011)

De acordo com (ALVES, 2006 Apud VÁZQUEZ, 2006), o telúrio foi descoberto por volta de 1782 por Franz Joseph Müller Von Reichenstein, na Romênia, a partir de um minério de ouro denominado de calaverita (AuTe_2). Em 1798 foi isolado e nomeado por Martin Heinrich. É um elemento relativamente raro, pertence a mesma família química do oxigênio, enxofre, selênio, e polônio, todos denominados calcogênios. Segundo Alves (2006), quando cristalino, o telúrio é branco-prateado, e quando na forma pura apresenta um brilho metálico. É um semi-metal (metalóide), frágil e facilmente pulverizável. O telúrio amorfo pode ser obtido por precipitação de uma solução de ácido teluroso ou ácido telúrico. Entretanto, existem algumas controvérsias quanto ao fato deste telúrio ser realmente amorfo ou constituído de minúsculos cristais. Este elemento é um semicondutor do tipo que demonstra condutividade maior em determinadas direções, dependendo do alinhamento atômico. Para (ENGELKE, 2010 Apud FERNANDES, 2012), o telúrio é muito utilizado na fabricação da liga de telureto de bismuto. A Figura 18 mostra um cristal elementar de telúrio.

Figura 18 – Cristal elementar de telúrio



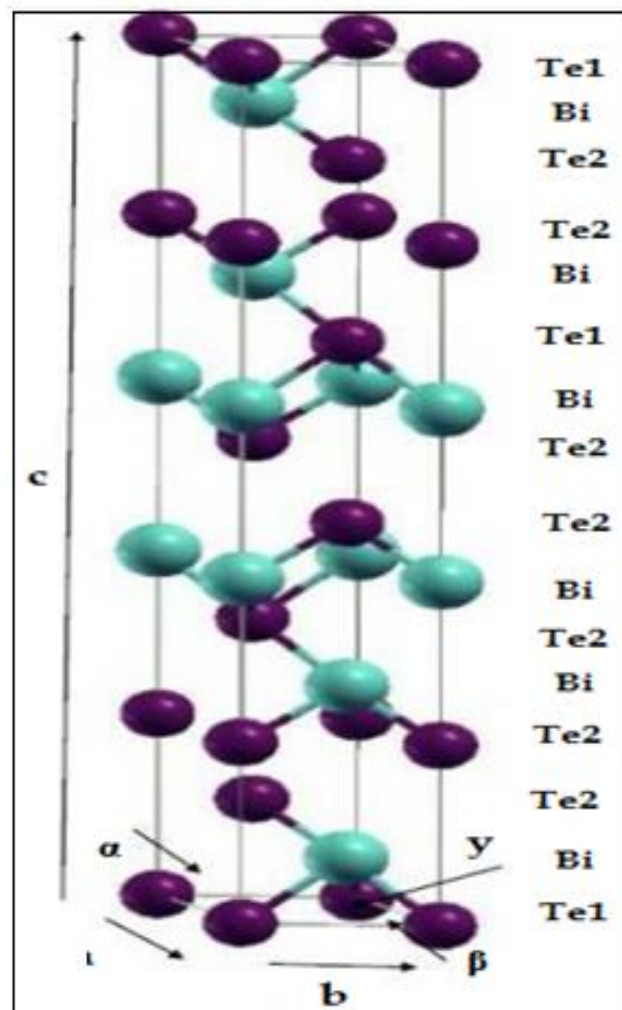
Fonte: Wikipédia (2018)

O composto telureto de bismuto (Bi_2Te_3) é um semicondutor da família V-VI, que representa características termoelétricas. Desta família, é o composto mais importante para aplicações em dispositivos refrigeradores, utilizando-se para isto associação de semicondutores tipo **p** e tipo **n**. A formação dos materiais tipo **p** e tipo **n** ocorrem através do desvio estequiométrico, sendo que, materiais com excesso de bismuto (Bi) são do tipo **p** e materiais com excesso de telúrio (Te) são do tipo **n** (MILLER, 1960).

Os átomos que compõem a estrutura do Bi_2Te_3 estão dispostos em camadas, e assim podem ser classificados como um semicondutor em camadas. As camadas Bi e Te são unidas por fortes ligações covalentes, enquanto que a ligação entre as camadas de Te adjacentes são ligações de Van der Waals, mais fracas. Esta ligação fraca entre as camadas de Te explica a facilidade de clivagem ao longo do plano perpendicular ao eixo (HARMAN, 2006).

O telureto de bismuto (Bi_2Te_3) cristaliza em uma estrutura de camadas com simetria romboédrico-hexagonal, onde os átomos roxos representam átomos de telúrio e os azuis representam os átomos de bismuto, conforme mostra a Figura 19.

Figura 19 - Célula unitária do telureto de bismuto



Fonte: Guerra (2017)

Em geral, os avanços em pesquisas para melhorar as propriedades de materiais termoelétricos, têm como foco o desenvolvimento de estruturas e materiais de alta eficiência.

Os geradores termoelétricos (TEG) utilizados para gerar energia elétrica, através do sistema concentrador solar, objeto proposto neste trabalho, tem como fonte de energia térmica o Sol. Estes geradores foram avaliados com base em parâmetros de termoeletricidade, onde equações de desempenho foram utilizadas para melhor entender os resultados alcançados durante os testes de campo e que serão apresentados graficamente no capítulo 6.

3.4 Equações de Desempenho de Geradores Termoelétricos

De acordo com Beng (2011), um gerador termoelétrico opera como um motor térmico e, como tal, obedece às leis da termodinâmica. Se considerarmos o conversor operando como um gerador ideal no qual não há perdas de calor, a eficiência é definida como a razão da potência elétrica entregue à carga (P_L) ao calor absorvido na junção quente (Q_h) e pode ser expressa pela equação (3.7)

$$\eta = \frac{I^2 \cdot R_L}{Q_h \cdot (T_h - T_c) \cdot \lambda_{pn}} \quad (3.7)$$

onde P_L corresponde ao produto da corrente elétrica ao quadrado pela resistência elétrica ($I^2 \cdot R_L$) e (λ_{pn}) corresponde a condutância térmica em paralelo da junção p-n.

Analisando a tensão máxima (V) produzida pelos geradores termoelétricos que estão interligados em série entre si no concentrador surge, uma carga resistiva (R_L), externa ao fenômeno. Por sua vez, R seria uma resistência interna do dispositivo, como numa pilha, que também tem resistência interna, dissipando parte da energia produzida antes de atingir o circuito externo, e uma tensão (V_n) é fornecida para a carga, sendo expressa através da equação (3.8)

$$V_n = nI \cdot R_L = n \cdot [\alpha_{pn} \cdot (T_h - T_c) - R \cdot I] \quad (3.8)$$

onde (V) é a tensão elétrica medida em Volts, (n) o número de junções, (R_L) a resistência de carga sendo medida em Ohm, sobre a qual irá passar a corrente elétrica (I) sendo medida em Amper, e ($R \cdot I$) é a tensão perdida na resistência interna (R), medida em Ohm.

Conforme mostra a equação (3.8), podemos isolar a corrente elétrica (I) e reescrever a equação (3.9)

$$\alpha_{pn} \cdot (T_h - T_c) = I(R_L + R) \quad (3.9)$$

onde (T_h) e (T_c) são medidos em Kelvin.

A corrente elétrica (I) que circula pelos geradores termoelétricos é uma relação entre o gradiente de temperatura da face quente e face fria do gerador e a resistência total, podendo ser expressa pela equação (3.10)

$$I = \frac{\alpha \cdot (T_h - T_c)}{R_L + R} \quad (3.10)$$

onde a corrente elétrica (I) independe do número de termopares. (T_h) e (T_c) são medidos em Kelvin.

A potência elétrica (W_n) dissipada na resistência de carga (R_L) é o produto entre a tensão e corrente elétrica ($V_n \cdot I$), ou seja:

$$W_n = V_n \cdot I = \frac{\alpha^2 \cdot (T_h - T_c)^2}{R} \cdot \frac{\frac{R_L}{R}}{(1 + \frac{R_L}{R})^2} \quad (3.11)$$

3.4.1 Parâmetros Máximos de desempenho do gerador termoelétrico

Segundo Elarusi (2016), para qualquer gerador termoelétrico, existem dois tipos de parâmetros máximos, o primeiro é o parâmetro máximo na potência máxima e o segundo é o parâmetro máximo de conversão. Esses dois modos podem ser obtidos modificando a razão de resistências ($\frac{R_L}{R}$) em relação às condições de operação.

A corrente máxima geralmente mede-se na condição de curto-circuito, onde a resistência de carga $R_L = 0$. A corrente máxima pode ser obtida da equação (3.9) fazendo-se $R_L = 0$ e é reescrita através da equação (3.12)

$$I_{max} = \frac{\alpha \cdot (T_h - T_c)}{R} \quad (3.12)$$

onde (α) é o coeficiente de Seebeck, (T_h) é a temperatura quente, (T_c) é a temperatura fria, medidos em Kelvin e (R) é a resistência total.

Como a tensão máxima ocorre no circuito aberto, onde $I = 0$, a corrente é zero na equação (3.9) e é expressa da seguinte maneira pela equação (3.13)

$$V_{n \max} = n \alpha_{pn} \cdot (T_h - T_c) \quad (3.13)$$

Para obter a potência máxima, a equação (3.11) da potência de saída nos termopares (W_n) é diferenciada em relação a sua razão de resistências $\frac{R_L}{R}$ o que ocorre para $(\frac{R_L}{R} = 1)$ como mostra a relação abaixo:

$$\frac{d(W_n)}{d(\frac{R_L}{R})} = 0 \rightarrow \frac{R_L}{R} = 1 \quad (3.14)$$

Agora, substituindo $\frac{R_L}{R} = 1$ na equação (3.10), o resultado leva à equação de potência máxima, escrita pela equação (3.15)

$$W_{n \max} = \frac{\alpha^2 \cdot (T_h - T_c)^2}{4R} \quad (3.15)$$

Semelhantemente, a eficiência máxima de conversão pode ser obtida diferenciando a equação (3.7) em relação a $(\frac{R_L}{R})$ e a equação do resultado fornecerá a máxima eficiência de conversão como descreve a equação (3.16)

$$\eta_{mp} = \frac{\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right)}{2 - \left(\frac{1}{2}\right)\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) + \frac{4T_c}{ZT_h}} \quad (3.16)$$

onde

$$\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) = \eta_c \quad (3.17)$$

é a eficiência de Carnot (ELARUSI, 2016).

Todos os parâmetros de desempenho máximo apresentados acima referem-se a propriedade do material e seu fator geométrico ($G = \frac{A}{L}$), ou seja, corresponde a área da seção transversal da junção termopar (p e n), dividido pela distância entre contatos, isto é entre dois materiais tipo **p** ou **n**.

O valor efetivo da figura de mérito pode ser formulado a partir da equação (3.15) e expressa pela equação (3.18)

$$Z^* = \frac{\frac{4}{T_c} \left(\frac{T_c}{T_h} \right)}{\eta_c \left(\frac{1}{\eta_{mp}} + \frac{1}{2} \right) - 2} \quad (3.18)$$

A partir da equação (3.10), foi possível reescrever as equações (3.19) e (3.20) e assim poder ajustar os valores das tensões e correntes elétricas para calcular a potência elétrica referente a cada medição.

$$V_n = n \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot \frac{\left(\frac{R_L}{R} \right)}{\left(\frac{R_L}{R} \right) + 1} \quad (3.19)$$

$$W_n = n \cdot I^2 \cdot R \cdot L \quad (3.20)$$

onde (α) é o coeficiente de Seebeck, (ΔT) é a diferença de temperatura das junções frias e quentes, (I) é a corrente gerada no circuito, R é a resistência elétrica total, (V_n) é a tensão através a resistência de carga, (n) é o número de termopares no módulo, (R_L) é a resistência de carga e (W_n) é a potência de saída do termopar no módulo gerador termoelétrico.

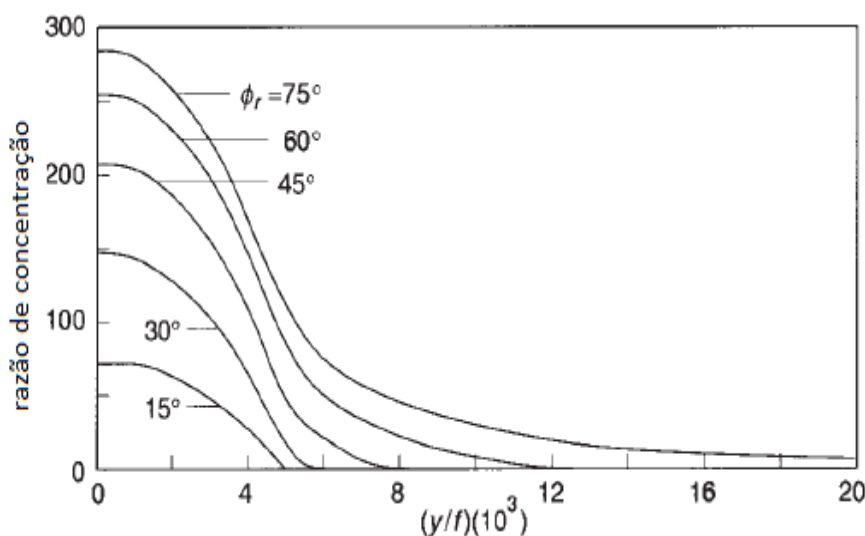
4. ESTUDO DE CASO

4.1 Dimensionamento do Sistema Concentrador Heliotérmoeletrico de Efeito Seebeck

Um correto entendimento desses parâmetros permite fazer uma análise técnica e econômica de maneira que o coletor atenda as necessidades pelo qual foi projetado, bem como evitar perdas óticas, com a intenção de obter uma eficiência desejável do sistema.

De acordo com Duffie (2013), a razão de concentração dos raios solares está relacionada com a abertura e o ângulo de borda do concentrador solar. Conforme mostra a Figura 20, a distribuição da concentração dos raios solares é apresentada para cinco ângulos de borda distintos. A medida que o ângulo de borda aumenta, a taxa de concentração aumenta, assim como a área do coletor. As distribuições mostram taxas de concentração mais baixas no centro da imagem e proporções mais altas nas extremidades.

Figura 20 – Taxa de concentração



Fonte: Duffie (2013)

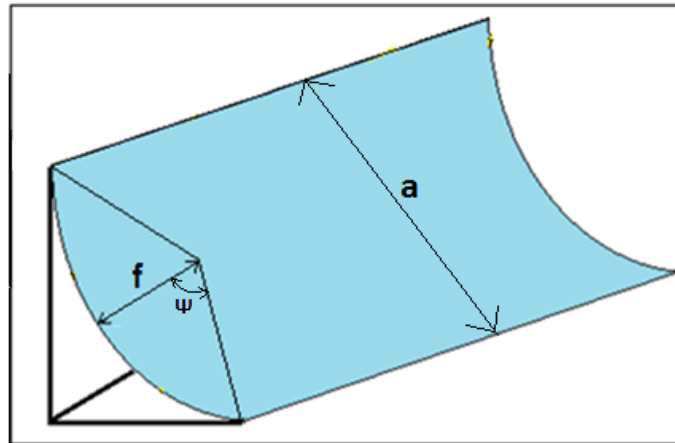
Partindo da equação para determinação de uma parábola, tem-se que:

$$X^2 = 2PY \quad (4.1)$$

Os principais parâmetros geométricos para projetar o concentrador solar cilíndrico-parabólico são: distância focal, ângulo de borda do coletor e abertura do

coletor, onde distância focal (f) é a distância entre o vértice da parábola e o foco do coletor, o ângulo de borda (ψ) é formado entre o segmento de reta que une o vértice ao foco e une o foco à extremidade do coletor e abertura do coletor (a) é a distância entre as duas bordas da seção transversal do coletor, conforme mostra a Figura 21.

Figura 21 – Parâmetros geométricos



Fonte: Própria autoria (2019)

As três variáveis referentes a seção transversal do coletor podem ser correlacionadas de maneira a descrever completamente a seção transversal da superfície refletora. Essa relação é dada pela equação:

$$\text{Tang } \psi = \frac{(a/f)}{(1/8)(a/f)^2} \quad (4.2)$$

onde:

ψ = ângulo de borda

a = comprimento da área do coletor

f = distância focal

Colocando tudo em função do ângulo de borda, a equação fica da seguinte forma:

$$a/f = -\frac{4}{\text{tg } \psi} + \sqrt{\frac{16}{\text{tang}^2 \psi} + 16} \quad (4.3)$$

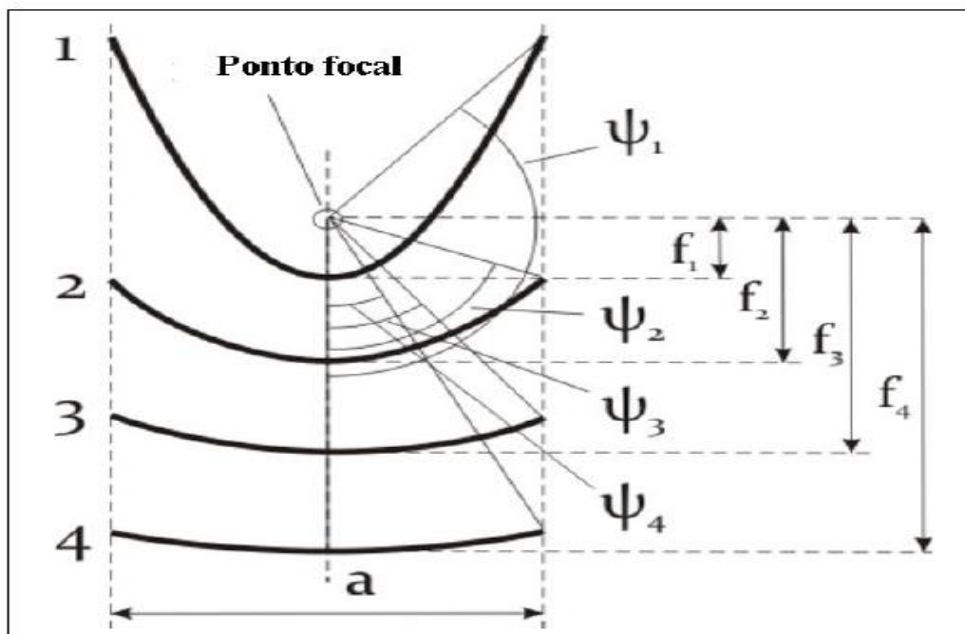
Considerando um coletor com a mesma abertura, ângulos de borda menores proporcionam maiores taxas de concentração, coletando a mesma quantidade de energia

solar com menor comprimento de superfície refletora, embora ângulos de borda maiores que 90° evitam que o gerador termoelétrico fique diretamente exposto ao ar ambiente, diminuindo assim o calor por convecção, porém necessita de uma área refletora maior.

Considerando que a superfície refletora não é perfeita tem-se que o efeito dessas imperfeições aumenta proporcionalmente a distância percorrida pela radiação solar desde a reflexão até o gerador termoelétrico. Sendo assim, ângulos de bordas entre 75° e 90° são os mais indicados para garantir a eficiência na captação dos raios concentrados no foco do concentrador.

Na Figura 22 é possível notar que para uma mesma abertura do coletor, a distância focal varia em função do ângulo de borda.

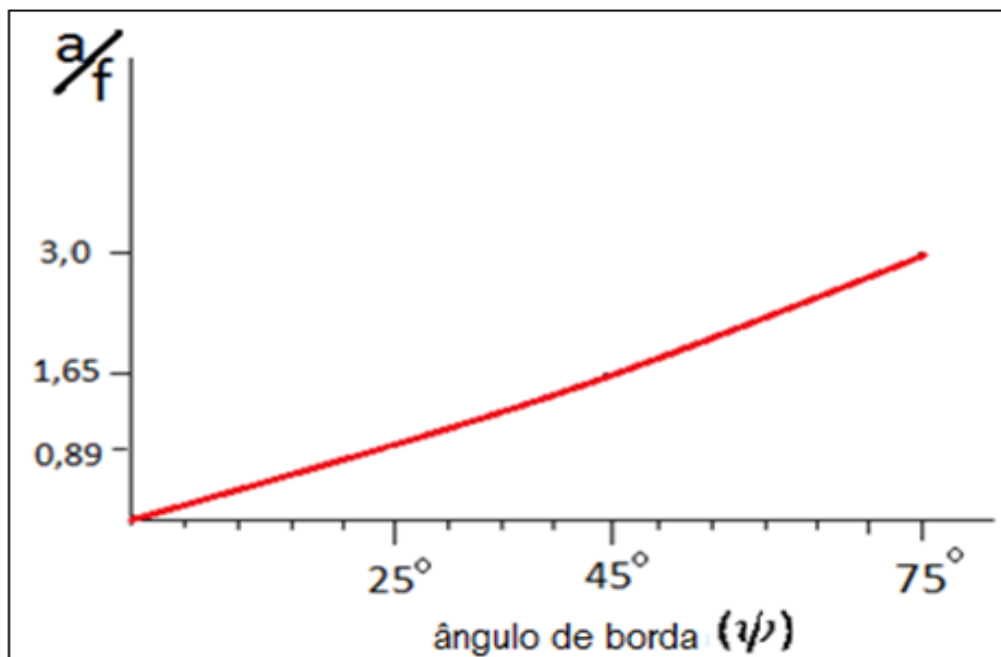
Figura 22 – Relação entre distância focal e ângulo de borda



Fonte: Gunther et al (2011)

A equação (4.3) descrita acima foi utilizada para traçar o perfil parabólico dos dois protótipos do sistema concentrador heliotermoelétrico de efeito Seebeck e pode ser melhor interpretado no Gráfico 7. Aplicando a equação 4.3, para os ângulos 25° , 45° e 75° , foram encontrados três valores adimensionais que correspondem a relação a/f . A partir desses valores foi possível estabelecer a relação entre o ângulo de borda e a relação a/f , conforme mostra o Gráfico 7.

Gráfico 7 – Relação entre ângulo de borda e relação a/f

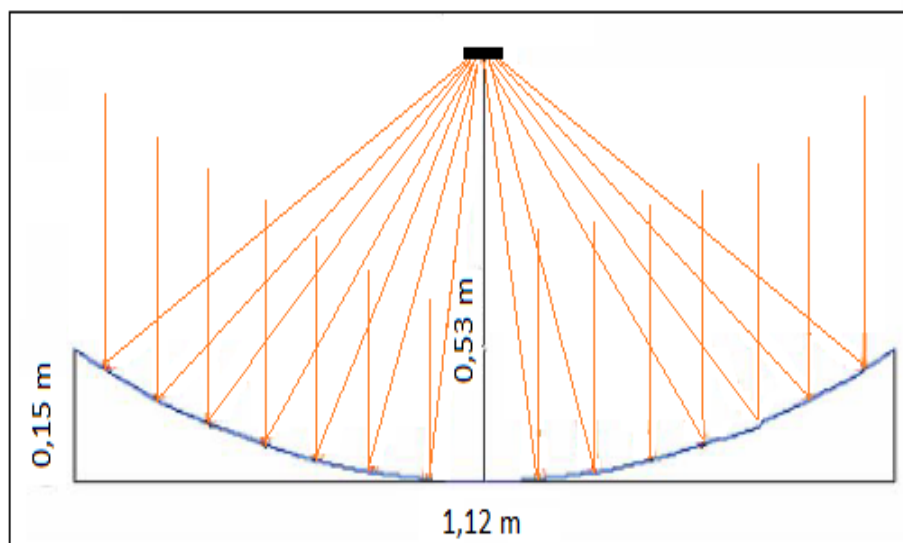


Fonte: Própria autoria (2019)

Conforme já comentado anteriormente, o concentrador solar possui uma geometria que está diretamente relacionada ao ângulo de borda, pois há uma relação direta com a área de abertura do coletor. Conforme mostra a Figura 32, ângulos inferiores a 60° fazem com que o foco tende a ficar fora da parábola, aumentando muito a distância entre o vértice da parábola e o foco, uma vez que os raios solares percorrem uma distância até atingir o ponto focal, havendo assim um maior espalhamento dos raios solares. Ângulos superiores a 90° fazem com que o foco tende a ficar muito próximo ao vértice da parábola diminuindo as perdas por convecção, porém os raios solares percorrem uma grande distância até atingir o ponto focal, causando um maior espalhamento dos raios solares (DUFFIE, 2013).

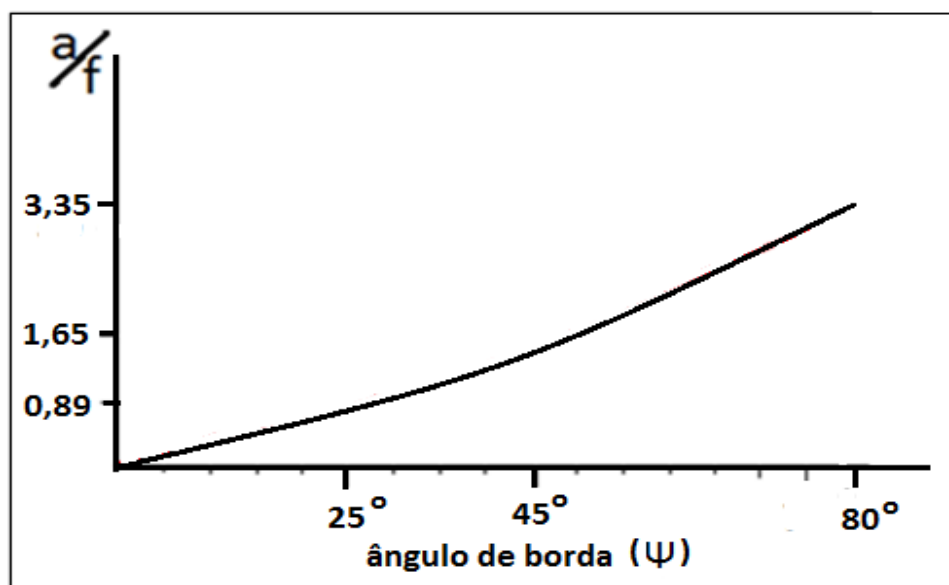
A partir da escolha da abertura do concentrador solar em 1,12 m, tendo calculado a altura do foco a partir da equação 4.1 e adotando o ângulo de borda em 75° , foi possível determinar o perfil do primeiro protótipo do sistema concentrador heliotérmico de efeito Seebeck, conforme mostra a Figura 23.

Figura 23 – Perfil parabólico do primeiro protótipo



Fonte: Própria autoria (2019)

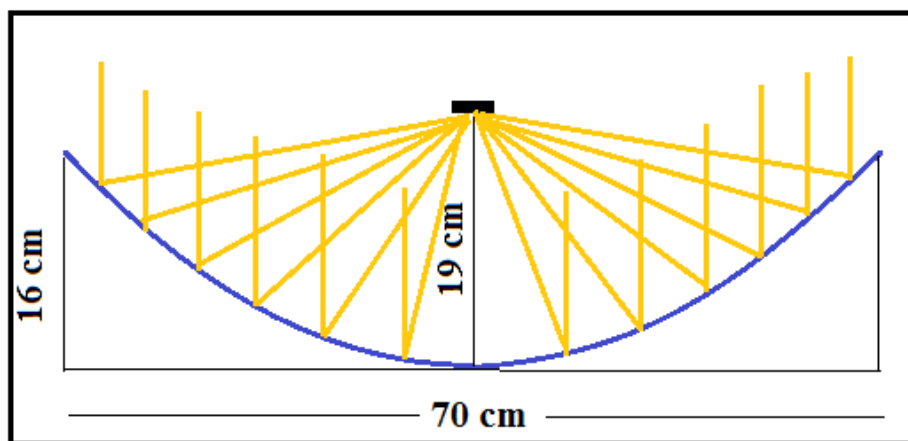
Aplicando a equação (4.3) para os ângulos de 25° , 45° e 80° obteve-se a relação entre o ângulo de borda e a relação a/f , conforme mostra o Gráfico 8.

Gráfico 8 – Relação entre ângulo de borda e relação a/f 

Fonte: Própria autoria (2019)

A partir da escolha da abertura do concentrador solar em 0,70 m, tendo calculado a altura do foco a partir da equação 4.1 e adotando o ângulo de borda em 80° , foi possível determinar o perfil do segundo protótipo do sistema concentrador heliotermoelétrico de efeito Seebeck, conforme mostra a Figura 24.

Figura 24 – Perfil parabólico do segundo protótipo



Fonte: Própria autoria (2020)

4.2 Construção do Primeiro Sistema Concentrador Heliotermoeletrico de Efeito Seebeck

O primeiro protótipo do concentrador solar proposto é constituído por: um coletor solar no formato cilíndrico-parabólico dimensionado a partir da equação da parábola (4.1).

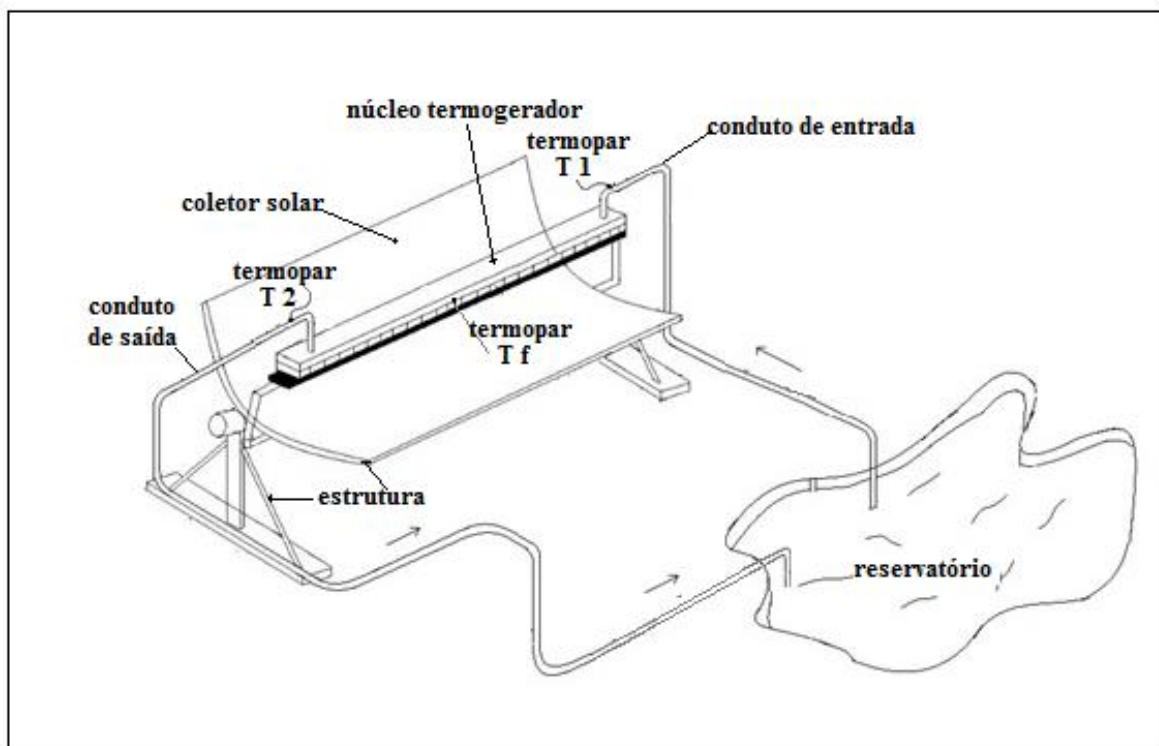
O concentrador foi revestido por uma superfície reflexiva, contém um núcleo termogerador e um sistema de refrigeração. A estrutura do concentrador solar foi construída em aço metalon, possuindo em ambas as extremidades dois suportes para fixação do núcleo termogerador.

O núcleo termogerador, foi constituído por um conjunto de módulos termoeletricos, interconectados em série e fixados sobre uma barra de aço metalon utilizando pasta térmica, para dissipar melhor o calor. A barra de aço foi negritado com tinta de alta performance de forma a absorver o máximo possível o calor proveniente dos raios solares e, por condução, transferir o calor para o lado quente dos módulos termoeletricos. O lado oposto dos módulos termoeletricos foi fixado sobre um conduto feito em aço Metalon, utilizando pasta térmica, para resfriar a face fria dos módulos termoeletricos, proporcionando assim melhor gradiente de temperatura.

O circuito de refrigeração é composto por um reservatório de água, sendo este o lago da Universidade Federal de Itajubá e uma bomba submersa. A bomba é utilizada para recalcar a água do reservatório e conduzi-la à entrada do núcleo termogerador com a finalidade de manter resfriado o lado frio dos módulos termoeletricos. Após passar

pelo núcleo termogerador, a água retorna ao reservatório, repetindo o ciclo, conforme mostra a Figura 25.

Figura 25 – Esquema do primeiro concentrador solar proposto



Fonte: Própria autoria (2019)

Foi utilizado um termopar (T1), como mostra a Figura 25, para registrar a temperatura da água na entrada do núcleo termogerador, enquanto o termopar (T2) foi utilizado para registrar a temperatura da água na saída do núcleo termogerador e o termopar (Tf) foi utilizado para registrar a temperatura na face quente dos módulos termogeradores.

Foi utilizado um potenciômetro conectado na saída do núcleo termogerador como carga para variar a resistência do circuito elétrico e assim poder obter diversos níveis de tensão e corrente elétrica. Foi considerada a temperatura da água do lago da Universidade como a temperatura de entrada no núcleo termogerador devido o comprimento do núcleo termogerador ser de apenas 1,60 m e a vazão da bomba ser de 1050 litros de água por hora. A Figura 26 mostra os equipamentos utilizados na bancada de testes.

Figura 26 – Bancada de testes



Fonte: Própria autoria (2019)

4.2.1 Construção do Coletor Solar

A primeira fase da construção foi a modelagem do perfil cilíndrico-parabólico da calha coletora, sendo esta confeccionada em aço metalon. Para isto foi utilizado uma calandra. Após a modelagem, os perfis foram unidos utilizando solda elétrica, conforme mostram as Figuras 27 e 28.

Figura 27 – Perfil cilíndrico-parabólico



Fonte: Própria autoria (2019)

Figura 28 – Estrutura de sustentação



Fonte: Própria autoria (2019)

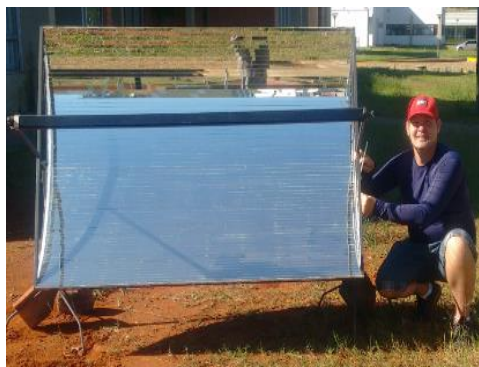
O revestimento do coletor solar foi feito em chapa de zinco galvanizado, servindo de apoio para fixação das tiras de vidro espelhado. A estrutura de sustentação do coletor solar foi confeccionada em aço metalon, tendo em ambas as extremidades, dois suportes integrados, utilizados para suportar o núcleo termogerador, conforme mostram as Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Fixação dos espelhos



Fonte: Própria autoria (2019)

Figura 30 - Coletor solar



Fonte: Própria autoria (2019)

4.2.2 Núcleo Termogerador

Para dar suporte aos módulos termoeletrônicos foi utilizada uma barra de aço metalon. Inicialmente a barra foi negritada com tinta de alta performance, suportando temperaturas de até 300 °C. A barra de aço possui espessura de 5,0 mm e foi cortada na dimensão de 1,60 m de comprimento, o mesmo tamanho da abertura do coletor solar. Em seguida os oito módulos termoeletrônicos Danvic, modelo HC-40-15.4 foram fixados e interligados em série. Um dos lados dos módulos (denominado lado quente) foi preso sobre a barra de aço negritada. Utilizando pasta térmica a base de silicone, tomou-se o cuidado de evitar bolhas de ar entre a superfície da barra e os módulos, melhorando a dissipação do calor, conforme mostram as Figuras 31 e 32.

Figura 31 – Tinta de alta performance



Fonte: Própria autoria (2019)

Figura 32 – Fixação dos módulos Peltier



Fonte: Própria autoria (2019)

Em seguida o conduto de água, de seção retangular foi fixado do lado oposto dos módulos termoeletrônicos (denominado lado frio). O conduto possui dimensões de 1,60 m de comprimento, 5,0 cm de largura e 2,0 cm de espessura, por onde irá circular a água,

mantendo baixa a temperatura do lado frio dos módulos, conforme mostram as Figuras 33 e 34.

Figura 33 – Conduto d'água



Fonte: Própria autoria (2019)

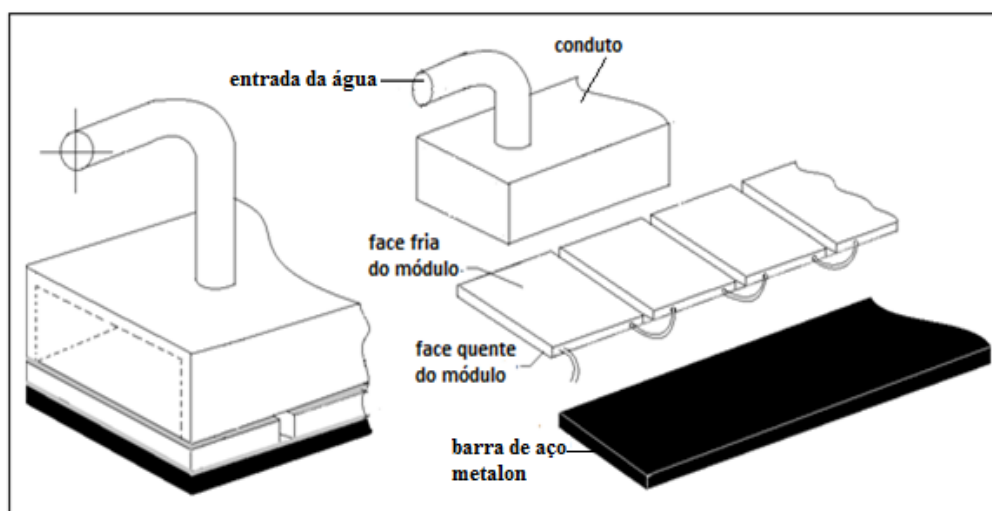
Figura34 – Núcleo termogerador



Fonte: Própria autoria (2019)

Na Figura 35, é possível visualizar detalhadamente como foi construído o núcleo termogerador.

Figura 35 – Esquema detalhado do núcleo termogerador



Fonte: Própria autoria (2019)

4.2.3 Sistema de Refrigeração

Devido a disponibilidade do recurso hídrico e melhor eficiência do sistema, foi utilizado o lago da Universidade Federal de Itajubá- Campus José Seabra, como reservatório de água para refrigerar o núcleo termogerador. O sistema de refrigeração é constituído por uma bomba submersa Anauger Ecco 60973 e mangueiras flexíveis para

conduzir a água do lago ao sistema de refrigeração dos módulos, passando pelo núcleo termogerador e retornando ao lago, repetindo o ciclo, conforme mostra a Figura 36.

Figura 36 – Sistema de refrigeração



Fonte: Própria autoria (2019)

4.3 Construção do Segundo Sistema Concentrador Heliotermoelétrico de Efeito Seebeck

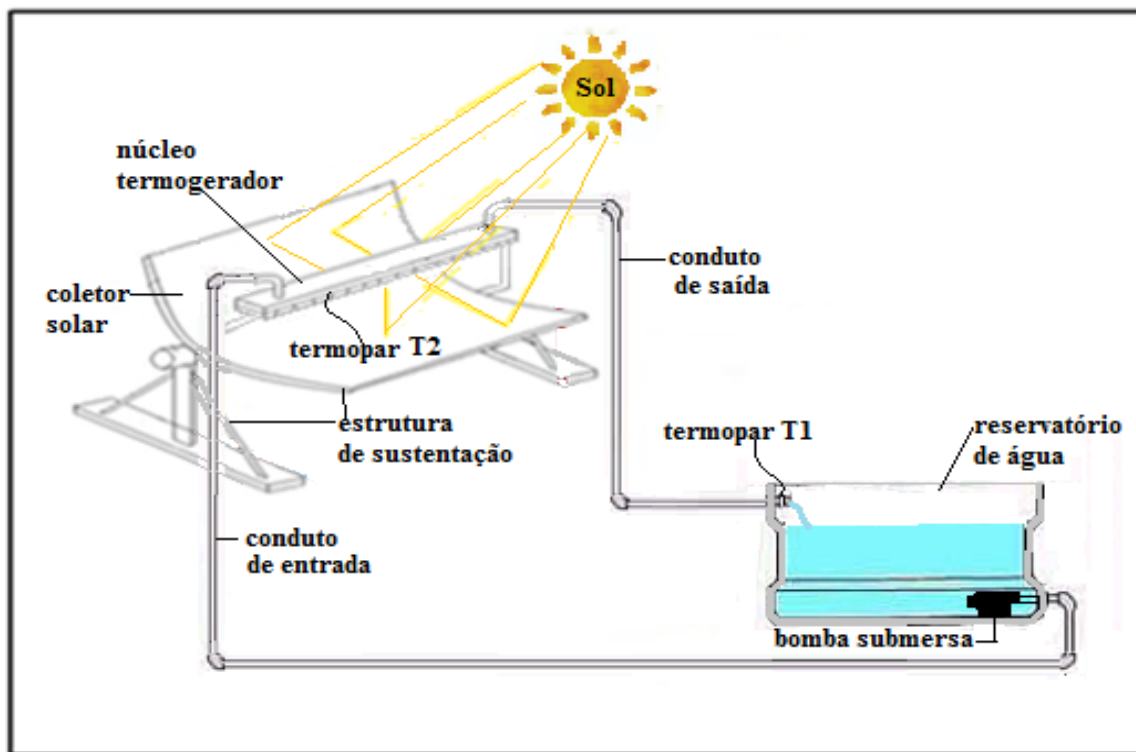
O segundo protótipo do concentrador solar é constituído por: coletor solar cilíndrico-parabólico, núcleo termogerador, bomba submersa e reservatório de água. Para este segundo concentrador solar foi utilizado madeira MDF com dimensões de 70 cm de comprimento e 70 cm de abertura, possui em ambas as extremidades, dois suportes metálicos para fixação do núcleo termogerador. O revestimento da superfície reflexiva do coletor foi feito utilizando tiras de vidro espelhado, fixadas sobre a chapa de zinco galvanizada.

O núcleo termogerador possui dimensões de 70 cm de comprimento e 4 cm de largura, sendo constituído por um conjunto de seis módulos termoelétricos, interconectados em série entre si. O lado quente dos módulos termoelétricos está exposto diretamente à radiação solar e o lado frio, fixado com pasta térmica no conduto de água. A finalidade do conduto de seção retangular é fazer com que a face fria dos módulos fiquem paralelas a superfície externa do conduto, garantindo assim que a água ao circular internamente pelo conduto, resfrie por igual a superfície dos módulos termoelétricos.

O sistema de refrigeração é composto por um reservatório de água com capacidade para 30 litros e uma bomba submersa Anauger Ecco 60973. A água utilizada

para refrigerar o núcleo termogerador é mantida a temperatura de 22 °C, ao retornar para o reservatório com temperatura superior, a água é resfriada adicionando gelo e em seguida é reinserida no sistema, repetindo o ciclo. A Figura 37 mostra o esquema da bancada de testes.

Figura 37 – Esquema do segundo concentrador solar proposto



Fonte: Própria autoria 2019

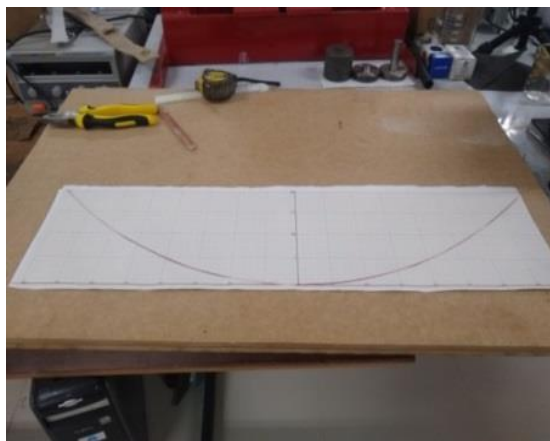
Para realizar o controle de temperatura foi inserido o termopar (T2) no núcleo termogerador, cujo objetivo é medir a temperatura na face quente dos módulos termoeletrônicos. Para determinar a temperatura da água de saída foi utilizado o termopar (T1).

A construção do segundo concentrador solar se divide em duas etapas, a primeira etapa se concentra na construção do concentrador solar e a segunda etapa se concentra na montagem do núcleo termogerador. O protótipo passou por pequenas alterações de projeto onde foi retirada a barra de aço metalon negritada para observar o comportamento do núcleo termogerador ao absorver os raios solares concentrados diretamente na face quente dos módulos termoeletrônicos.

4.3.1 Coletor Solar

O coletor solar foi construído em MDF, no formato cilíndrico-parabólico a partir do molde feito com auxílio do Excel no formato cilíndrico-parabólico. Seu revestimento foi feito por uma chapa de eucatex, a qual serve de apoio para fixação do vidro espelhado, conforme mostram as Figuras 38 e 39.

Figura 38 – Molde do concentrador solar



Fonte: Própria autoria (2019)

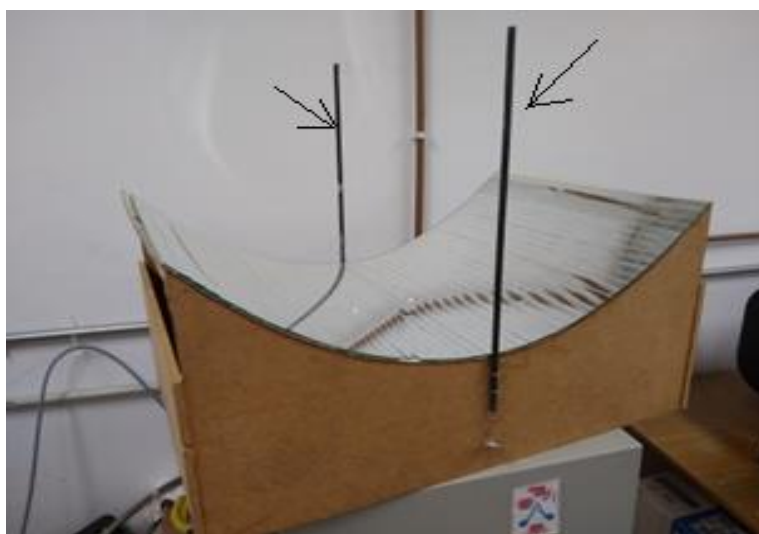
Figura 39 – Revestimento em mdf



Fonte: Própria autoria (2019)

A estrutura de sustentação do coletor solar possui em ambas extremidades dois suportes metálicos fixados, utilizados para sustentação do núcleo termogerador, responsável por concentrar a radiação solar refletida, conforme mostra a Figura 40.

Figura 40 – Suportes de sustentação



Fonte: Própria autoria (2020)

4.3.2 Núcleo Termogerador

O núcleo termogerador é composto por sete módulos termoelétricos Danvic, modelo HC-40-15.4, ligados em série. O sendo que o lado frio dos módulos estão fixados com pasta térmica no conduto de seção retangular, o qual mede 0,50 cm de comprimento; 5,0 cm de largura e 2,0 cm de espessura. O conduto de água é utilizado para proporcionar o fluxo do fluido. O lado quente dos módulos ficarão exposto à radiação solar concentrada. Durante os ensaios um dos módulos apresentou defeito e o mesmo foi isolado dos demais. As Figuras 41e 42 mostram a montagem do núcleo termogerador.

Figura 41 – Montagem do núcleo termogerador



Fonte: Própria autoria (2019)

Figura 42 – Núcleo termogerador



Fonte: Própria autoria (2019)

4.3.2 Sistema de Refrigeração

O sistema de refrigeração do núcleo termogerador é composto por um reservatório com capacidade para 30 litros de água e uma bomba submersa Pump HM-5063. A água do sistema será utilizada para manter refrigerada a face fria dos módulos a uma temperatura (T_1) de 22 °C. A água circula pelo núcleo termogerador, trocando calor, proveniente da radiação solar concentrada, e retorna para o reservatório com temperatura (T_2) superior a 22 °C, a água é resfriada, adicionado cubos de gelo, para manter a água do sistema a temperatura inicial (T_1).

Figura 43 – Sistema de refrigeração



Fonte: Própria autoria (2020)

4.4 Equipamentos Utilizados nos Ensaios

Para a realização dos ensaios foram utilizados os equipamentos e instrumentos de medição descritos nos próximos itens.

4.4.1 Termômetro Digital Infravermelho

Foi utilizado o termômetro digital infravermelho Infrared Global Eye para medir as temperaturas de entrada e saída da água, e a temperatura focal devido sua eficiência, pois além de realizar medições por meio de luz infravermelha sem tocar no objeto, possui sensores termopares para realizar medições diretamente no objeto. O termômetro possui um laser, que auxilia no posicionamento do sensor para realizar a leitura do objeto. Possui ainda uma lente óptica e um sistema de amplificadores e filtros que transmitem a radiação do corpo até um medidor que emite uma resposta proporcional a radiação que pode ser associada a temperatura da superfície. Os termômetros infravermelhos constituem uma família dentro dos termômetros de radiação, pois medem uma faixa específica de radiação, que vai de 0,7 a 20 μm de comprimento de onda.

Figura 44 – Termômetro Infrared Global Eye



Fonte: Própria autoria (2019)

4.4.2 Wattímetro

Foi utilizado o Wattímetro da marca Lutron, modelo DW-6060 para medir as tensões e correntes elétricas geradas pelo núcleo termogerador devido sua facilidade em realizar medições de tensão e corrente elétrica em um mesmo aparelho, de forma rápida, sem alterar qualquer conexão entre o aparelho e a carga a ser realizada a medição. Este equipamento é composto por três bobinas, sendo que uma é a bobina do voltímetro e duas são as bobinas fixas do amperímetro. A bobina do voltímetro é unida paralelamente ao circuito elétrico, enquanto as bobinas fixas do amperímetro têm sua ligação em série. Assim como o voltímetro e o amperímetro, o wattímetro mede a tensão sem qualquer fluxo de corrente e também mede a corrente sem inserir alguma queda de tensão em suas extremidades. O wattímetro é um instrumento que faz a medição da potência elétrica fornecida por uma carga. A potência elétrica é uma resultante dos valores de tensão e corrente elétrica e sua unidade de medida é o watts. A bobina do voltímetro dispõe uma resistência que diminui a corrente.

Figura 45 – Wattímetro digital DW-6060



Fonte: Própria autoria (2019)

4.4.3 Potenciômetro

Foi utilizado um potenciômetro de 100Ω na saída no núcleo termogerador como carga por permitir variar a resistência das tensões e correntes elétricas produzidas pelo núcleo termogerador por possuir um cursor com eixo rotatório. O potenciômetro consiste em um elemento resistivo, chamado de “pista”, ou “trilha”, e de um cursor móvel, que se movimenta ao longo de um eixo, rotatório ou linear. De acordo com a posição desse cursor ao longo do eixo, a resistência obtida será diferente, dentro de certos limites característicos do componente em questão. Quando aplicamos uma tensão elétrica entre os terminais de início e fim, a tensão elétrica obtida no terminal central irá variar conforme o cursor se move ao longo da pista. Assim, o potenciômetro funciona como um divisor de tensão resistivo.

Figura 46 – Potenciômetro



Fonte: Própria autoria (2019)

4.4.4 Bomba Submersa

Foi utilizada a bomba submersa da marca Anauger, modelo Ecco 60973 para bombear a água do lago da Universidade, passando pelo núcleo termogerador e retornando novamente ao lago. Esta bomba submersa é um tipo de motobomba projetada para o bombeamento de água, sendo utilizado para abastecer cisternas, caixas de água e outros reservatórios. A bomba submersa é um tipo de bomba que funciona completamente imersa em água, ou seja, ela consegue trabalhar envolta pelo fluido que está sendo bombeado. A profundidade de trabalho é, geralmente, de no máximo 20 metros, dependendo do modelo de bomba. Segundo o fabricante, a vazão da bomba é de: 1050 litros de água por hora, para elevação de até 10 metros; 700 litros de água por

hora, para elevação de até 30 metros e 450 litros de água por hora, para elevação de até 50 metros.

Figura 47 - Bomba submersa Anauger Ecco 60973



Fonte: Própria autoria 2019

4.4.5 Piranômetro

Foi utilizado o piranômetro de alta temperatura CM4 Kipp & Zonen. Este instrumento de medição foi fixado sobre o núcleo termogerador para medir a radiação solar incidente. Este instrumento é um radiômetro especialmente projetado para medir a irradiação da luz solar ou artificial sob as mais extremas condições de temperatura. Com uma faixa de temperatura de operação de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ e medição de até 4000 W/m^2 . O Piranômetro CM4 possui compensação de temperatura interna e um sensor de temperatura PT-100, integrado para fornecer informações adicionais sobre as condições de medição. O piranômetro é um tipo de dispositivo eletrônico é utilizado para medir a intensidade da radiação em W/m^2 . Este é um instrumento de calibração importante para a caracterização de células solares. Com o seu emprego pode-se medir a radiação incidente sobre uma célula ou painel fotovoltaico e calcular a sua eficiência.

Figura 48 – Piranômetro Kipp e Zonen CM4



Fonte: Própria autoria (2020)

4.4.6 Espectrofotômetro

Foi utilizado o espectrofotômetro Stellar Net, modelo SL1, utilizado para medir a intensidade da luz solar que atinge o concentrador solar. Se trata de um aparelho cuja função é medir e comparar a quantidade de luz (energia radiante), porém com resolução espectral, isto é, em função do comprimento de onda da radiação. Em geral, um espectrofotômetro possui uma fonte estável de energia radiante (normalmente uma lâmpada incandescente), um seletor de faixa espectral monocromatizadores como os prismas, que seleciona o comprimento de onda da luz que passa através da solução de teste. A base da espectrofotometria, portanto é passar um feixe de luz através da amostra e fazer a medição da intensidade da luz que atinge o detector.

Figura 49 – Espectrofotômetro Stellar Net SL1



Fonte: Própria autoria (2020)

4.4.7 Unidade Fonte/Medida SMU

Foi utilizado a unidade de fonte/media Keithley 2600 para medir as tensões e correntes elétricas geradas pelo núcleo termogerador. Seu sistema de medição de fonte I-V(SMU) poder ser utilizado como ferramenta de caracterização I-V de bancada ou como componentes básicos de sistemas de teste I-V multicanal. Para uso em bancada, os instrumentos da série 2600A apresentam uma Ferramenta de software TSP Express integrada, que permite aos usuários executar rapidamente sem instalar ou programar software. A unidade SMU Keithley 2600 A, permite fazer medições de tensão e corrente elétrica a quatro fios o que torna mais preciso os resultados obtidos. O método de medição de resistência de 4 fios, envolve o uso de medidas através de um amperímetro e um voltímetro, sendo o amperímetro ligado em série com a fonte de

excitação do SMU (em dois fios) e o voltímetro ligado em os outros dois fios em paralelo. A função de 4 fios utiliza a medida da tensão para corrigir a queda de tensão devido à resistência dos fios entre a SMU e a amostra a ser medida, permitindo a eliminação matemática desta resistência espúria. Resistências muito pequenas podem ser medidas facilmente usando esta técnica.

Figura 50 – Unidade Fonte/Medida SMU Keithley 2600 A



Fonte: Própria autoria (2020)

4.4.8 Termômetro Icel TD-911

O termômetro TD-911 é um instrumento portátil de 3½ dígitos e possui entrada para dois termopares do tipo “k” de níquel-cromo e níquel-alumínio (NiCr-NiAl). Sua temperatura de operação é de -50 °C a 1300 °C.

Figura 51 – Termômetro Icel TD-911



Fonte: Própria autoria (2020)

4.4.9 Controlador de Temperatura Digital STC-1000

O termostato STC-1000 é um instrumento indicado para controlar e mediar temperaturas que variam entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ através de dois relés, instalados internamente. O termostato possui um display digital que possibilita a visualização das temperaturas lidas, além de possuir três botões que permitem fazer o setup dos parâmetros para controlar a temperatura de ambientes que necessitam ser monitorados a uma determinada faixa de temperatura, como por exemplo câmaras frigoríficas.

Figura 52 – Termostato STC-1000



Fonte: Própria autoria (2020)

4.5 Ensaio com o Primeiro Sistema Concentrador Heliotermoelétrico de Efeito Seebeck

Os ensaios de temperatura ocorreram entre os dias 09 e 10/01/2019. O concentrador solar ficou orientado no sentido Leste/Oeste, acompanhando a trajetória do Sol ao longo do dia. Os ensaios iniciaram às 8:00 h e terminaram às 17:00 h, com intervalos de trinta minutos entre cada medição. Conforme mostram as Figuras 53 e 54, foram registradas temperaturas que variaram entre $78\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ no período da manhã e entre $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $195\text{ }^{\circ}\text{C}$ no período da tarde. As variações de temperaturas se devem a velocidade do vento que foi registrado entre 1,6 a 4,8 Km/h, e devido o surgimento de nuvens.

Figura 53 – Temperatura registrada pela manhã



Fonte: Própria autoria (2019)

Figura 54 – Temperatura registrada a tarde



Fonte: Própria autoria (2019)

A Tabela 3 foi construída a partir dos parâmetros analisados durante os ensaios, para os respectivos horários em que as medições foram registradas.

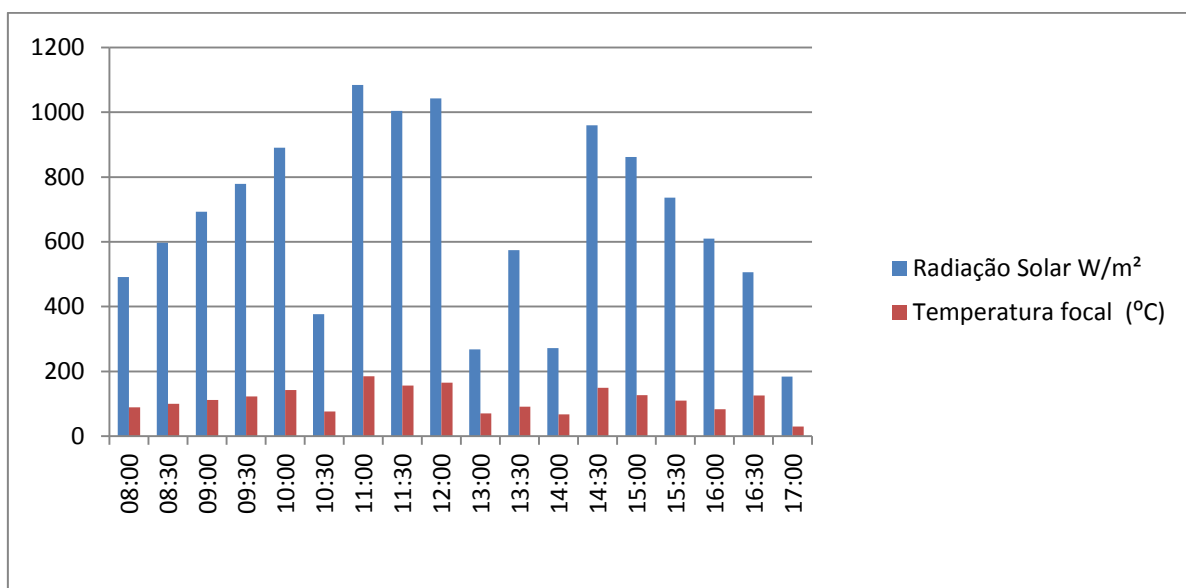
Tabela 3 – Parâmetros analisados com o primeiro concentrador solar

Horário (h)	Radiação Solar W/m ²	Temperatura focal (°C)	Veloc. do vento (Km/h)
08:00	491	89,2	1,6
08:30	597	99,5	3,2
09:00	693	112,1	3,2
09:30	779	122,2	3,2
10:00	891	142,7	3,2
10:30	377	76,1	1,6
11:00	1084	185,3	3,2
11:30	1004	155,9	6,4
12:00	1043	165,4	6,4
13:00	268	70,6	6,4
13:30	574	91,3	4,8
14:00	272	66,8	4,8
14:30	960	149,3	3,2
15:00	862	126,8	4,8
15:30	736	110,2	4,8
16:00	610	83,5	4,8
16:30	506	125,4	3,2
17:00	184	29,3	3,2

Fonte: Própria autoria (2019)

A partir dos valores apresentados na Tabela 4, foi possível construir o Gráfico 9, comparando as temperaturas registradas no foco com seus respectivos índices de radiação.

Gráfico 9 – Temperatura focal em função da radiação solar



Fonte: Própria autoria (2019)

Após os ensaios de temperatura, o núcleo termogerador foi inserido no concentrador solar e posicionado à beira do lago da Universidade Federal de Itajubá, utilizando a água do lago para manter refrigerado a face fria dos módulos termoelétricos, compondo assim o sistema de refrigeração. Após a montagem do sistema de refrigeração, foi analisado o comportamento do concentrador solar quanto à variação de corrente elétrica (I) e tensão elétrica (U). Foi utilizado: o Wattímetro, para medir as correntes e tensões elétricas; o potenciômetro, como carga, variando sua resistência; o termômetro infravermelho para medir as temperaturas no foco do concentrador solar e dois termopares para medir a temperatura da água na entrada e saída do núcleo termogerador. Os instrumentos utilizados estão descritos no capítulo 5.

Figura 55 - Análise de comportamento do primeiro concentrador solar

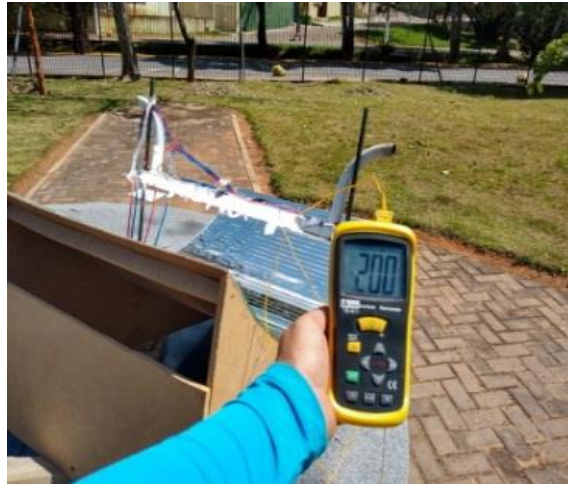


Fonte: Própria autoria (2019)

4.6 Ensaios com o Segundo Sistema Concentrador Heliotermoeletrico de Efeito Seebeck

Os ensaios com o segundo concentrador solar ocorreram no dia 22 de Abril de 2020, entre 08:00h e 12:00h. Os primeiros ensaios analisaram apenas a intensidade das temperaturas registradas no foco do concentrador solar, conforme mostra a Figura 56.

Figura 56 – Temperatura focal



Fonte: Própria autoria (2020)

Após o ensaio de temperatura e ajuste do foco do concentrador solar, uma bancada foi montada utilizando a fonte/medida SMU, o termostato digital STC-1000, o termômetro Icel TD-911, o espectrofotômetro e o piranômetro, conforme mostra a Figura 57.

Figura 57 – Bancada de testes



Fonte: Própria autoria (2020)

Com esta configuração foi possível analisar o comportamento dos módulos termoeletricos em diferentes índices de radiação solar. Os parâmetros mesurados foram:

tensão elétrica (U), corrente elétrica (I), temperatura da face fria dos módulos termoeletrônicos (T1) e temperatura focal (Tf). Os valores de corrente elétrica variaram entre 0,001A e 0,26A e os valores de tensão elétrica variaram entre 0,099 V e 2,99 V. Conforme já mostrado na Figura 53 acima, a temperatura na face fria dos módulos foi mantida a 22 °C. A Tabela 4 apresenta os valores lidos durante as primeiras medições.

Tabela 4 – Parâmetros analisados com o segundo concentrador solar

Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Resistência (Ω)	Radiação solar (W/m²)
0,10	0,26	0,03	0,38	379.4
0,20	0,25	0,05	0,80	385.5
0,30	0,23	0,07	1,28	392.1
0,40	0,22	0,09	1,80	399.4
0,50	0,21	0,10	2,40	407.2
0,60	0,20	0,12	3,06	415.4
0,70	0,18	0,13	3,83	430.8
0,80	0,17	0,14	4,68	433.6
0,90	0,16	0,14	5,65	443.3
1,00	0,15	0,15	6,76	453.5
1,10	0,14	0,15	8,03	463.8
1,20	0,13	0,15	9,51	474.5
1,30	0,12	0,15	11,27	485.4
1,40	0,10	0,15	13,36	496.5
1,50	0,09	0,14	15,92	507.6
1,60	0,08	0,13	19,07	518.8
1,70	0,07	0,13	22,97	529.9
1,80	0,07	0,12	27,66	548.8
1,90	0,06	0,11	33,69	552.2
2,00	0,05	0,10	41,90	563.1

Fonte: Própria autoria (2020)

5. METODOLOGIA

A construção do primeiro concentrador solar proposto ocorreu a partir do dimensionamento do perfil do coletor utilizando o cálculo da parábola, descrito pela equação 4.1 no capítulo 4. Após a construção do perfil, o coletor solar foi revestido por vidros espelhados por apresentar índice de refletividade de 0,96 %. Foi construído um núcleo termogerador composto por módulos termoelétricos interligados em série entre si, fixados um de seus lados sobre uma barra de aço metalon.

Após inserir o núcleo termogerador no coletor solar, foram realizados ensaios de campo para avaliar o comportamento do concentrador solar em função da tensão elétrica e corrente elétrica gerada na saída do núcleo termogerador. Para a realização do primeiro ensaio foi inserido um potenciômetro na saída do núcleo termogerador para variar a resistência elétrica em dez diferentes níveis, obtendo assim diferentes valores de tensão e corrente elétrica, sendo medidos através de um wattímetro.

Após a realização das medições, foi gerada uma planilha a partir dos valores obtidos de corrente e tensão. A partir desses valores foram calculados resistência e potência elétrica para cada valor correspondente de corrente e tensão elétrica. Após a obtenção desses valores foi calculado a eficiência energética, e por último foi obtida através dos cálculos a potência solar total do sistema. Todos os valores experimentais foram obtidos em um mesmo instante de tempo e índice de radiação solar.

Após inserir o núcleo termogerador no coletor solar, foram realizados ensaios para analisar o comportamento do concentrador solar quanto a tensão elétrica e corrente elétrica gerada na saída do núcleo termogerador. Foi inserido uma carga na saída do núcleo termogerador e um wattímetro para registrar os valores de tensão e corrente elétrica. Após ter realizado as medições, foi criada uma planilha no Excel com os valores lidos de corrente e tensão elétrica. A partir desses valores foram calculados e anotados os valores de resistência e potência elétrica para cada valor de corrente e tensão elétrica. Após anotado esses valores foi calculado a eficiência energética para cada instante das leituras realizadas e por último foi calculado a potência solar total do sistema. Todos os valores foram lidos em um mesmo instante de tempo e índice de radiação solar, que também foram anotados em planilha.

O segundo concentrador solar foi construído em madeira de MDF. Seu novo perfil possui dimensões de 70 cm de comprimento, 70 cm de abertura e altura do foco

de 19 cm, inferiores ao primeiro concentrador solar. Este novo perfil se deve ao fato de que o concentrador foi submetido a um simulador solar, de dimensões internas de 75 cm de largura e 70 cm de profundidade. Um novo núcleo termogerador foi construído, onde os lados quentes dos módulos termoelétricos ficaram expostos a radiação solar por não possuir a barra de aço metalon, eliminando impedância causada pela mesma e analisar a eficiência dos módulos em absorver diretamente os raios solares. Após inserir o núcleo termogerador ao concentrador solar, foram realizados ensaios para analisar o comportamento do concentrador solar quanto a corrente e tensão elétrica.

Os primeiros ensaios foram realizados no laboratório de caracterização de materiais do Instituto de Física e Química da Universidade. Foi utilizado um simulador solar, porém foi observado que os raios gerados pela lâmpada do simulador emitiam raios em um único sentido, insidindo apenas em uma parte do coletor, o que não foi possível a concentração no foco, o que resultou numa temperatura máxima de 60 °C. Por este motivo os demais ensaios ocorreram no lado externo do laboratório, onde o concentrador solar foi submetido à radiação solar, atingindo temperaturas acima de 200 °C. Foi utilizada a fonte/medida SMU conectado a quatro fios de forma que as medidas não sofressem interferências de resistência ôhmica, perda de corrente e tensão elétrica.

Os valores de parâmetro do módulo termoelétrico foram calculados através das equações (3.19) e (3.20), descritas no capítulo 3 e utilizados para analisar o comportamento da corrente e tensão elétrica dos módulos termoelétricos através de gráficos que serão apresentados no capítulo 6.

Para análise dos resultados foi utilizado o algoritmo metaheurístico de evolução diferencial adaptativa (EDA). A partir dos valores coletados de corrente e tensão foi possível extrair parâmetros para determinar a condutividade elétrica (ρ), condutividade térmica (K) e figura de mérito (Z) do conjunto de módulos termoelétricos estudados. De acordo com Febba et al (2020), o método foi introduzido pela primeira vez por Storn e Price (1997). Em 2006 ele foi aprimorado por Brest et al (2006) automatizando os parâmetros fator de mutação (F) e a razão de crossover (CR). O EDA otimiza a função de base populacional, seguindo regras evolutivas. É uma ferramenta utilizada para encontrar o mínimo global de funções não lineares e multimodais e está entre os algoritmos evolutivos mais populares. Atualmente, em uso devido à sua simplicidade e eficiência, sendo amplamente empregado para o problema de extração de parâmetros em diversas áreas na engenharia e que foi adaptado para avaliar os parâmetros dos

módulos termoeletrônicos (ELSAYED et al, 2013). Para utilização do método, foram setados limites inferior e superior dos parâmetros dentro dos limites físicos permitidos. Tais limites são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Limites utilizados para ajuste dos parâmetros

Limite	Número de junção (n)	Gradiente de temperatura (ΔT)	Coefficiente de Seebeck (α)	Resistência total (R)
inferior	700	30	0	0
superior	800	60	5	5

Fonte: Própria autoria (2020)

O método de evolução diferencial possui quatro estágios: inicialização, mutação, recombinação e seleção. Na primeira fase, um conjunto de 100 indivíduos é inicializado aleatoriamente para formar a população inicial, que irá evoluir através das gerações (G) ou até que algum critério seja alcançado. Cada indivíduo (X_i) é um candidato à solução ótima que minimiza a função objetiva (f). Um possível esquema para a inicialização da população é expressa da seguinte maneira:

$$X_{ij}^{G=1} = X_l^{G=1} + rand_{ij}(0,1). (X_U^{G=1} - X_l^{G=1}) \quad (5.1)$$

onde (rand) é um número aleatório entre 0 e 1.

O índice i vai de 1 ao tamanho da população NP, o índice j vai de 1 a 4, uma vez que o vetor X tem quatro componentes para o problema em estudo, XL e XU são os limites inferior e superior para os indivíduos, respectivamente, e definem o que é chamado de espaço de busca. Aqui, o índice j (0, 1) denota um número aleatório entre 0 e 1 com distribuição uniforme de probabilidade. O G denota o número da geração, indo de 1 ao número máximo de iterações (Gmax). Se este número aleatório for menor que o valor do crossover, esta nova geração irá receber o vetor de mutação, caso contrário, permanece o valor da geração anterior. Feito isto, a geração escolhida pelo programa passa por uma seção de testes, que compara o novo vetor gerado com o vetor anterior, e caso o novo vetor gerado for melhor que o anterior, ele substitui o vetor anterior. Este processo é analisado pelo programa ciclicamente 50 mil vezes, até encontrar a melhor solução.

No segundo estágio, denominado mutação, é formado um vetor doador. A partir do primeiro indivíduo gerado, o programa insere seu valor nas funções objetivas, ou seja, nas equações utilizadas para gerar curvas simuladas, para serem comparadas com os dados experimentais da raiz do erro quadrático médio (Root Mean Square Error-RMSE), gerando o primeiro conjunto de indivíduos. O programa repete esta operação para os cem (100) indivíduos daquela geração.

No segundo estágio, denominado vetor de mutação, é formado um vetor doador, sendo expressa da seguinte maneira:

$$V_i^G = X_i^G + F(X_{best}^G - X_i^G) + F(X_{r1}^G - X_{r2}^G) \quad (5.2)$$

onde (V) é o vetor de mutação, que irá selecionar os indivíduos que foram testados. (G, X_i^G) é a geração de indivíduos, onde G denota o indivíduo atual, X_{best}^G é o melhor indivíduo, ou seja, o indivíduo com o valor mínimo para o função objetiva (X_{r1}^G e X_{r2}^G) são escolhidos aleatoriamente, diferentes uns dos outros e do indivíduo atual X_i^G . Além disso, F ($F \in [0,2]$) é um número real, definido pelo usuário, chamado fator de mutação. Na fase final, chamada de recombinação (ou crossover), o vetor doador é misturado com o vetor alvo X_i^G , produzindo um vetor experimental U_i^G entre (0) zero e (1) um, onde é feita uma comparação, com os valores de crossover, sendo expressa da seguinte maneira:

$$U_{ij}^G = V_{ij}^G \text{ rand}(0,1), \leq CR \text{ ou } j = j_{rand} \quad (5.3)$$

onde (V_{ij}^G) é o vetor doador, j_{rand} é um número inteiro aleatoriamente escolhido no intervalo entre (1) um e (5) cinco e CR ($CR \in [0, 1]$) é outro número real, definido pelo usuário, conhecido como taxa de cruzamento. Por fim, após a recombinação, ocorre a etapa de seleção. O julgamento e vetores alvos são comparados, e os vetores que minimizam a função objetivo são selecionados para a próxima geração, ou seja,

$$X_i^{G+1} = U_i^G \text{ se } f(U_i) < f(X_i) \quad (5.4)$$

No entanto, em sua forma padrão, conforme descrito acima, o desempenho do algoritmo é altamente dependente das variáveis (F), descritas na Tabela 2, capítulo 4, definidas pelo usuário (Fébba et al., 2018; Jiang et al., 2013; Zhang e Sanderson, 2009).

De acordo com este trabalho, o fator de mutação é ajustado como:

$$F_i^{G+1} = F_l + \text{rand1} F_u \text{ com } \text{rand2} < \tau_1 \quad (5.5)$$

A partir desta análise, são utilizados os melhores parâmetros para serem adotados como parâmetro das curvas experimentais. Os valores dos dados experimentais obtidos durante os ensaios não são alterados, apenas ajustados e calculados os demais parâmetros apresentados na Tabela 7, capítulo seguinte.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Análise do Primeiro Sistema Concentrador Heliotermoelétrico de Efeito Seebeck

Na análise de comportamento do primeiro concentrador solar, conforme mostra o Gráfico 9, descrito no capítulo anterior, verificou-se que há uma relação entre o índice de radiação solar e a temperatura atingida no foco do concentrador.

Durante seis dias foram realizadas diversas medições de temperatura. Os parâmetros analisados foram: temperatura da água na entrada no núcleo termogerador, temperatura na face quente dos módulos termoelétricos, tensão e corrente elétrica. As medições foram feitas com intervalos entre cada medição de 30 minutos. Foram construídas seis Tabelas a partir das medições registradas com o maior índice de radiação solar, registrados no dia e hora em que as medições ocorreram e seus respectivos valores, referentes aquele parâmetro analisado no instante da medição. O potenciômetro foi ajustado manualmente para cada medição de tensão e corrente elétrica, com isto foi possível obter diferentes valores de tensão e corrente elétrica. Para isto, foi feita uma escala, dividida em dez níveis, variando do máximo (100 Ω) ao mínimo (0 Ω). As medições iniciaram às 08:00h e terminaram às 17:00h. A partir dos valores medidos de tensão e corrente elétrica foram calculados os valores de resistência elétrica, potência elétrica, potência solar, e a eficiência do concentrador solar. Na Tabela 6, utilizada como exemplo, é possível observar melhor os parâmetros analisados.

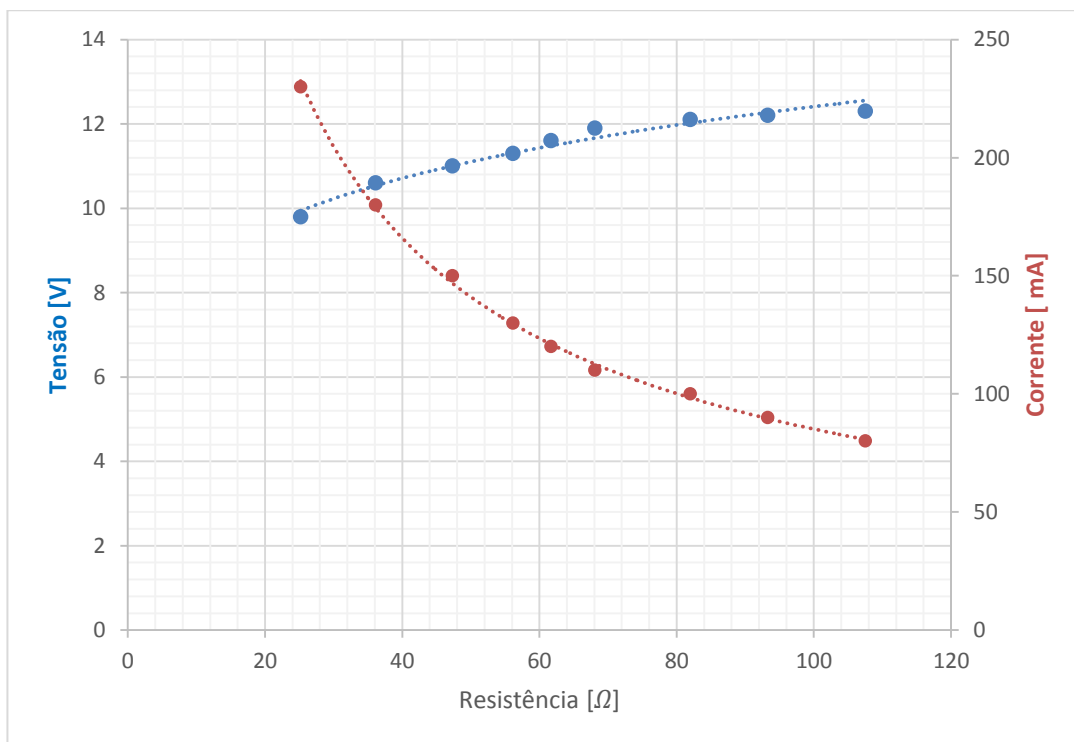
Tabela 6 – Potência solar em função do índice de radiação solar

área do núcleo termogerador: 0,0448 m² índice de radiação solar: 966 W/m² temp. na face quente: 138 °C temp. na face fria: 29 °C	Valores medidos		Valores calculados			
	Tensão elétrica [V]	Corrente elétrica [I]	Resistência elétrica [Ω]	Potência elétrica [W]	Eficiência [η]	Potência solar [W]
	12,3	0,12	102,5	1,48	3,41	43,28
	12,2	0,13	93,8	1,59	3,66	
	12,2	0,14	87,1	1,71	3,95	
	11,9	0,16	74,4	1,90	4,4	
	11,6	0,19	61,1	2,20	5,09	
	11,3	0,22	51,4	2,49	5,74	
	11	0,25	44,0	2,75	6,35	
	10,6	0,28	37,9	2,97	6,86	
	9,8	0,32	30,6	3,14	7,25	
	9,1	0,35	26,0	3,19	7,36	

Fonte: Própria autoria (2019)

Analisando os parâmetros de tensão e corrente elétrica conforme mostra o Gráfico 10, a medida que a resistência ôhmica do potenciômetro aumenta, a tensão elétrica também aumenta, enquanto que a corrente elétrica decresce, pois de acordo com a primeira lei de Ohm, a corrente que circula por um circuito é diretamente proporcional à tensão e inversamente proporcional à resistência.

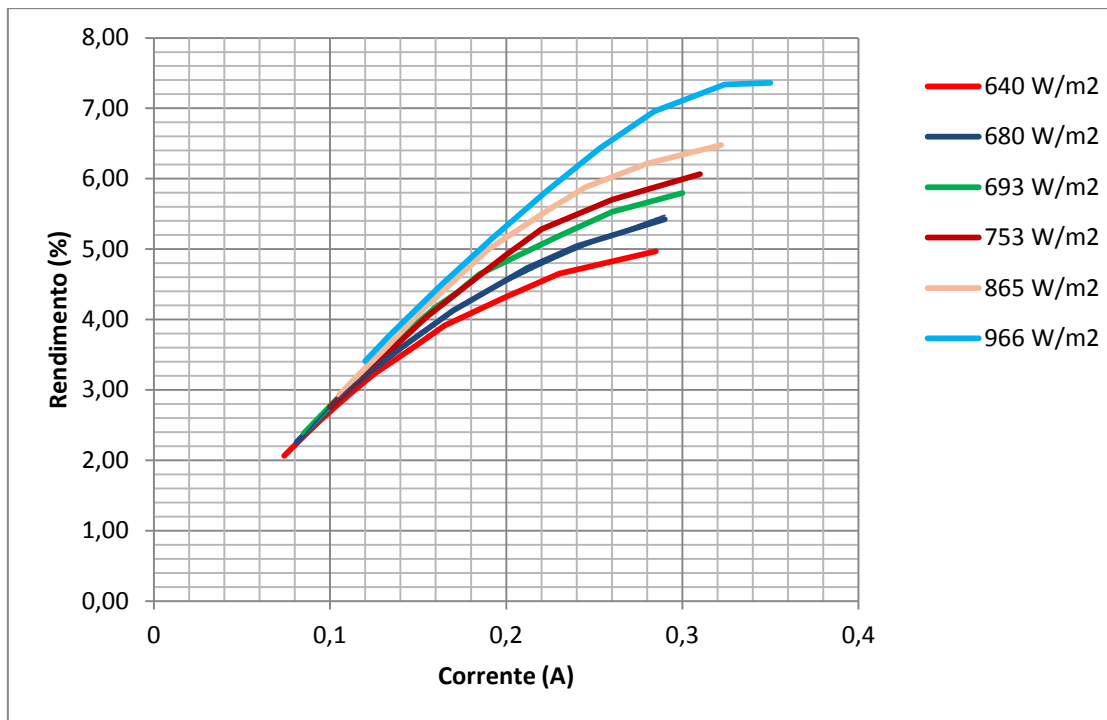
Gráfico 10 – Comportamento do núcleo termogerador



Fonte: Própria autoria (2019)

A partir das Tabelas construídas a exemplo da Tabela 5, as mesmas foram agrupadas, dando origem ao Gráfico 11. Analisando o Gráfico 11, é possível afirmar que o rendimento do concentrador solar está intrinsecamente ligado ao índice de radiação solar incidente. Quanto maior este índice de radiação, maior será a corrente gerada pelo núcleo termogerador. Percebe-se que para cada índice de radiação solar há um valor de corrente elétrica gerada.

Gráfico 11 – Rendimento do sistema em função da corrente elétrica



Fonte: Própria autoria (2019)

6.2 Análise do Segundo Sistema Concentrador Heliotermoelétrico de Efeito Seebeck

Como descrito no capítulo 5, foram realizadas medidas utilizando o novo concentrador solar em diferentes condições para localizar os parâmetros de melhor eficiência do mesmo. Nessas medidas foram extraídos os valores de corrente, tensão e variação de temperatura em um ponto do concentrador solar. A partir dessas medidas, foram utilizadas as equações (3.10), (3.19) e (3.20), para modelar os dados experimentais e obter os valores dos parâmetros analisados.

Conforme mostra a Tabela 7, a partir dos valores medidos durante os ensaios, foi utilizado o método para encontrar o coeficiente de Seebeck (α) e a resistência total (R) com os seis módulos utilizados no ensaio e suas respectivas temperaturas.

Tabela 7 – Parâmetros extraídos através do EDA e dos dados experimentais

medições	nº de junções	$\Delta T(K)$	Coef. Seebeck(α)	Resistência por elemento de junção (Ω)
1	762	43,86	2,74E-05	0,012
2	762	39,98	2,35E10-5	0,011

3	762	39,77	3,34E-05	0,012
4	762	45,72	4,63E10-5	0,011
5	762	35,77	8,87E-05	0,012
6	762	35,27	8,98E-05	0,012
7	762	32,79	7,18E-05	0,011
8	762	44,58	6,63E-05	0,012

Fonte: Própria autoria (2020)

Conforme mostra a Tabela 8, através do método de evolução diferencial foi possível obter os parâmetros de figura de mérito efetiva (Z^*), rendimento (η_c), rendimento máximo (η_{max}), corrente de curto circuito (I_{cs}), tensão de circuito aberto (V_{oc}) e potência máxima (P_{max}). Já os parâmetros de eficiência e figura de mérito, foram obtidos utilizando as equações (3.10), (3.19) e (3.20), descritos no parágrafo acima.

Tabela 8 - Parâmetros medidos e calculados

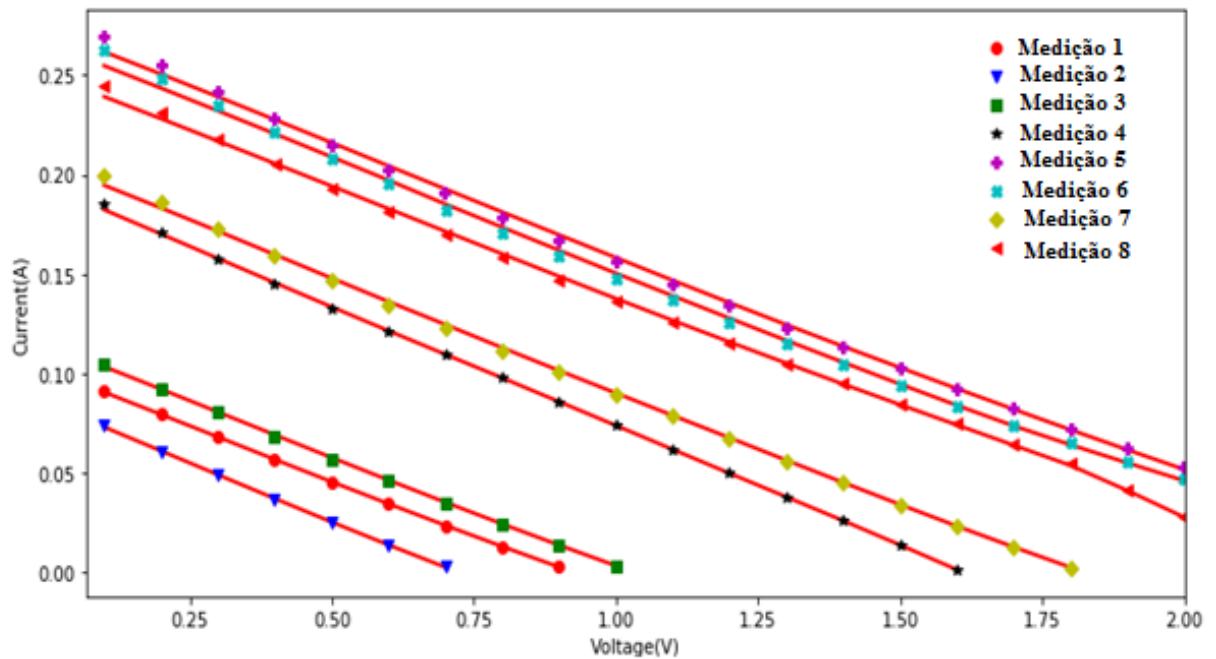
medição	Z^*	η_c	η_{max}	Corrente (Ics)	Tensão (Voc)	Potência (Pmax)
1	0,003115	0,098	0,0011	0,1	0,91	0,023
2	0,0031	0,096	0,001	0,08	0,72	0,015
3	0,0028	0,089	0,00086	0,11	1,01	0,029
4	0,0077	0,192	0,0046	0,19	1,61	0,078
5	0,00315	0,41459	0,03085	0,13	1,21	0,16
6	0,0066	0,173	0,0037	0,27	2,34	0,15
7	0,0072	0,184	0,042	0,21	1,79	0,09
8	0,00162	0,303	0,01367	0,25	2,25	0,14

Fonte: Própria autoria (2020)

Os dados experimentais e os ajustes são apresentados nos gráficos 12, 13,14 e 15.

No Gráfico 12, são apresentados valores de corrente em relação à tensão, obtidos experimentalmente através dos diferentes símbolos apresentados na legenda da figura. Além disso, na mesma figura são apresentados os ajustes obtidos através do método descrito no capítulo 5, representados por uma linha contínua na cor vermelha.

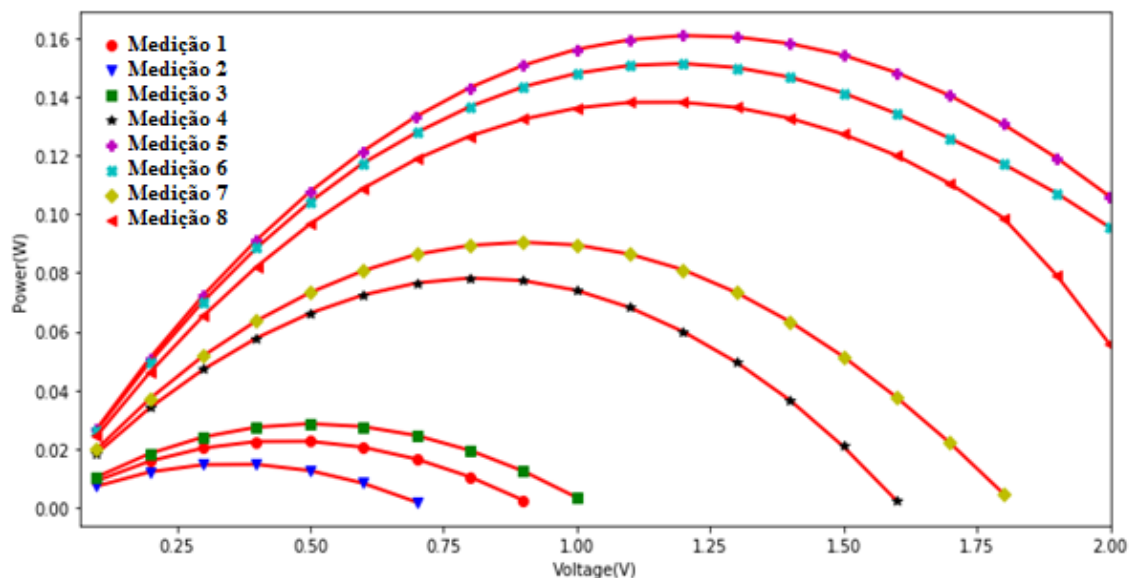
Gráfico 12 – Tensão em função da corrente elétrica



Fonte: Própria autoria (2020)

Comparando os dados apresentados no gráfico com os valores apresentados na tabela 8, é possível verificar que as medições 5 e 6, apresentaram maior valor de corrente em função da tensão e maior eficiência, sendo que, na Tabela 7, essas medidas foram realizadas com uma variação de temperatura (ΔT) em torno de 35K. Já as medições 1 e 2, apresentaram menores valores de corrente e a variação de temperatura foi em torno de 40K. Esse resultado também é visível no gráfico de potência versus tensão, apresentados no Gráfico 13, onde pode-se perceber que os melhores valores de potência foram obtidos em temperaturas em torno de 35K e os piores em torno de 40K. Tal resultado indica que o melhor gradiente de temperatura a ser utilizado no equipamento ocorre em torno de 35K. Além disso, podemos verificar na tabela 7 que esse valor do gradiente de temperatura influencia diretamente no coeficiente de Seebeck (α), pois em valores em torno de 35 K o coeficiente são maiores do que os realizados a 40K.

Gráfico 13 – Potência em função da tensão elétrica



Fonte: Própria autoria (2020)

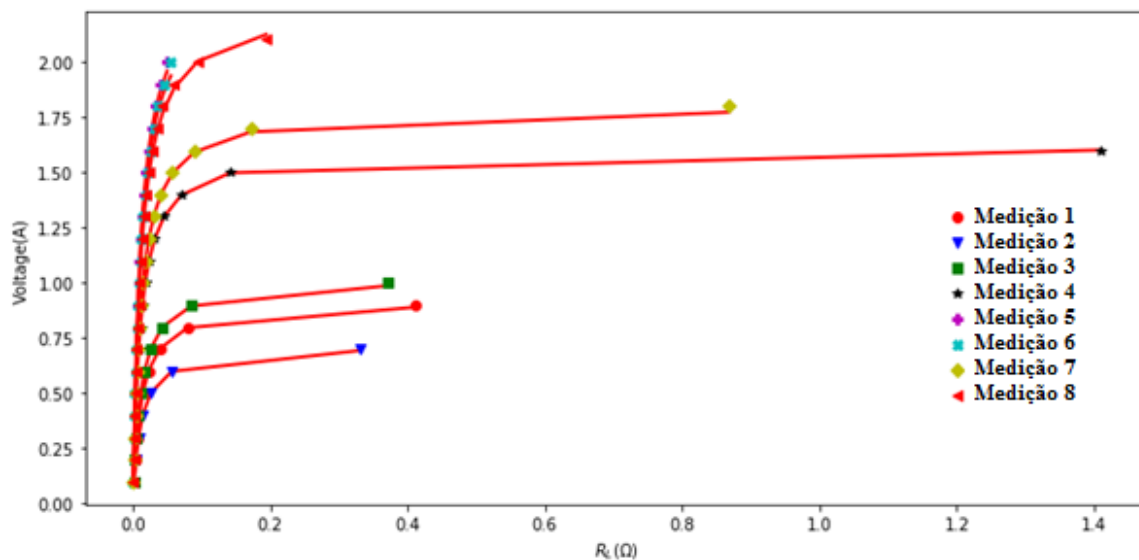
Os gráficos 14 e 15, apresentam a tensão em função da resistência da carga e a corrente em função da resistência da carga. Os símbolos indicam as diferentes medições realizadas e a linha contínua na cor vermelha indica o ajuste obtido através do método. Tais gráficos foram utilizados como função objetiva para obtenção dos parâmetros apresentados na Tabela 6 e os parâmetros utilizados para obtenção dos valores da corrente de curto circuito (I_{sc}), da tensão de circuito aberto (V_{oc}) e da potência máxima (W_{max}), apresentados na tabela 8.

Apesar dos parâmetros “número de junções” e “gradiente de temperatura” serem parâmetros já conhecidos no manual do fabricante, optamos por variar esses parâmetros num modelo de ajuste. Tal ação se fez necessária para o número de junções, pois havia uma suspeita dos módulos termoeletricos terem se sobreaquecidos e fundido, mas os resultados mostraram que isto não ocorreu. Já para o gradiente de temperatura, a medição foi realizada apenas em alguns pontos do módulo termoeletrico, com isso foi interessante estimar qual o verdadeiro valor médio do gradiente de temperatura ao longo de toda superfície dos módulos.

As tabelas 7 e 8, descritas acima, apresentam parâmetros tais como Figura de mérito efetiva (Z^*), rendimento (η), rendimento máximo (η_{max}), que são essenciais

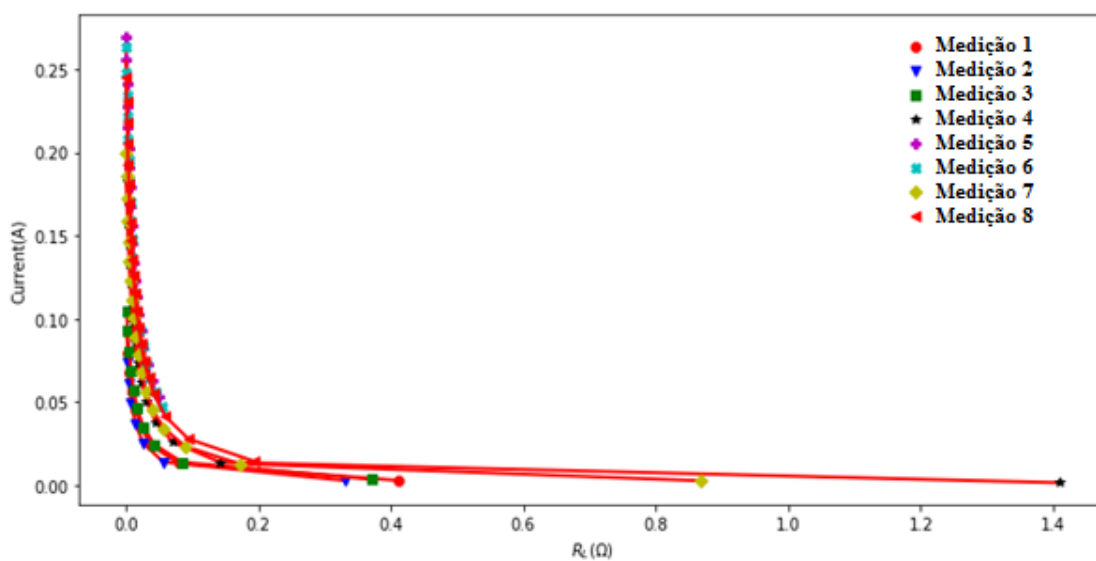
para caracterização de um módulo termoeétrico para disponibilização comercial, mostrando a região de maior eficiência do módulo e facilitando a arquitetura do concentrador solar. Tais resultados mostram a viabilidade de construção do concentrador para geração de energia.

Gráfico 14 - Tensão em função da resistência da carga



Fonte: Própria autoria (2020)

Gráfico 15 - Corrente em função da resistência da carga



Fonte: Própria autoria (2020)

Os resultados indicam que a metodologia de caracterização do simulador foi eficiente e mostra a viabilidade de produção dos mesmos para geração de energia elétrica. Apesar de termos utilizado materiais de baixo custo, tal como utilização de um módulo Peltier resfriador (TEC) ao invés de um gerador termoelétrico (TEG), a metodologia mostrou a viabilidade de utilização comercial de tal configuração para geração de energia.

7. CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos no presente trabalho, conclui-se que os objetivos propostos foram alcançados com a construção dos dois protótipos do sistema concentrador heliotermoelétrico de efeito Seebeck utilizados na conversão da energia solar concentrada em energia elétrica foram alcançados, uma vez que foi desenvolvido um núcleo termogerador, composto por refrigeradores termoelétricos (TEC), responsáveis pela conversão da energia térmica em energia elétrica, utilizando o Sol com fonte de energia.

Para os ensaios com o primeiro concentrador solar, o valor máximo de tensão na saída do núcleo termogerador foi de 9,0 V, para o horário em que as medições foram realizadas. O núcleo termogerador foi composto com (8) oito módulos termoelétricos. Já para o segundo protótipo, que foi um modelo reduzido, a tensão máxima gerada foi de 2,0 V com a utilização de (6) módulos termoelétricos. Além da redução da área do refletor e da quantidade de módulos verificou-se que alguns destes módulos estavam danificados durante este ensaio, devido valores de temperatura que variaram de 70 °C a 230 °C, justificando assim, a redução no valor da tensão de saída. Para o refrigerador termoelétrico utilizado, modelo Danvic DW40-10, a gradiente máximo permitido é de 80 °C. Uma opção para solucionar este problema está na utilização de geradores termoelétricos (TEG), que possuem uma temperatura de operação em torno de 140 °C, porém ele possui maior valor comercial de aproximadamente R\$ 110,00, enquanto o refrigerador termoelétrico (TEC) possui valor comercial de aproximadamente R\$18,00, valores estes consultados em 2020.

Uma condição ambiental muito importante para o funcionamento do sistema concentrador Heliotermoelétrico de efeito Seebeck, está na intensidade dos raios solares concentrados no núcleo termogerador. Outra condição importante está na característica de cada módulo termoelétrico, pois estes dependem do número de junções **pn**, potência elétrica máxima, tensão máxima e corrente máxima produzidas, além da temperatura máxima a que estão expostos.

Quanto sua eficiência, o primeiro protótipo do sistema concentrador Heliotermoelétrico de efeito Seebeck, mostrou eficiência máxima de 7,36% para o índice de radiação solar de 966 W e temperatura no núcleo termogerador de 138 °C, no momento da medição, como mostra a Tabela 6, capítulo 6.1. O segundo protótipo do

sistema Heliotérmico de efeito Seebeck, mostrou eficiência máxima de 4,47% para o índice de radiação solar de 780 W e um gradiente de temperatura no núcleo termogerador de 35,77 K no momento da medição, como mostra a Tabela 8. Além disso, para o segundo protótipo foram utilizados equipamentos mais precisos para a realização da caracterização do sistema concentrador Helioelétrico, utilizando a unidade de fonte/media Keithley 2600, que permitiu uma análise estatística dos dados experimentais. Tal metodologia estatística de ajuste possibilitou a extração de parâmetros fundamentais do equipamento de forma robusta. Tais parâmetros foram apresentados nas Tabelas 7 e 8.

Enfim, os dois protótipos se mostraram viáveis para geração de energia elétrica. Com os resultados apresentados é possível a construção de um sistema concentrador Helioelétrico eficiente para a produção de energia elétrica de forma limpa e direta, utilizando uma área útil inferior se comparado com plantas heliotérmicas convencionais.

8. SUGESTÕES

O trabalho traz uma contribuição através de sua revisão bibliográfica, coletando informações e dados característicos do comportamento da tecnologia Cilíndrico-parabólica, identificando e mostrando em forma de indicadores os aspectos relevantes para o estudo da evolução e desempenho desta tecnologia como capacidade de geração de energia elétrica utilizando geradores termoelétricos que utilizem materiais nanotecnológicos e mais eficientes.

Como sugestões para trabalhos futuros, seriam relevantes estudos direcionados ao gerador termoelétrico (TEG), por ser mais apropriado para sistemas de concentração solar, uma vez que os refrigeradores termoelétricos (TEC) são indicados para sistemas de refrigeração. Portanto, propõem-se como aperfeiçoamento em pesquisas futuras, melhorar as propriedades dos materiais e ligas, utilizados na fabricação dos geradores termoelétricos, para assim conseguir desenvolver geradores termoelétricos mais eficientes, que suportam maiores gradientes de temperatura, conseqüentemente, aumentando sua potência, tornando possível o Sistema Concentrador Heliotermodelétrico de Efeito Seebeck mais eficiente.

Enfim, vale ressaltar que a eficiência do sistema depende da potência gerada pelos geradores termoelétricos, onde o custo é o fator determinante para viabilidade ou não do projeto. Levando em consideração a seção transversal do núcleo termogerador de 1,60 metros, são necessários (40) quarenta geradores termoelétricos para atingir a eficiência máxima do sistema. O valor unitário do gerador termoelétrico (TEG) do tipo SP1848 27145SA, com capacidade de produz tensão de circuito aberto de 4,6 Volts e corrente elétrica de 669 mA é de aproximadamente R\$ 110,00, o custo do núcleo termogerador, sem considerar o conduto de água e as mangueiras para circulação da mesma, é de aproximadamente R\$ 4.400,00. Como os geradores estão associados em série, as tensões elétricas se somam, portanto, teoricamente o Sistema Concentrador Heliotermodelétrico de Efeito Seebeck pode produzir tensão elétrica de aproximadamente 184 volts. Na prática, os valores máximos reais, tanto de tensão, como corrente e potência elétrica, só podem ser obtidos de acordo com o índice de radiação solar, no instante em que forem realizadas as medições.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.A. **Análise energética dos ciclos rankine e combinado com gaseificação integrada operados a carvão mineral**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFJF. Disponível em: < http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/AndreFrancaDeAlmeida.pdf >. Acesso em maio de 2020.

ALVES, A.F. **Energia solar fotovoltaica**. UNESP 201. Disponível em: < http://www4.feb.unesp.br/dee/docentes/alceu/2379teo_arquivos/02P%20Aula%20Energia%20Solar%20FV.pdf >. Acesso em Junho de 2019.

ALVES, E.O. **Propriedades físicas do semicondutor Bi₂Te₃**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRGN. Disponível em: < <ftp://ftp.ufrn.br/pub/biblioteca/ext/btd/EdvaldoOA.pdf> >. Acesso em Dezembro de 2018.

AMBIENTE ENERGIA. **Energia heliotérmica é utilizado na produção de queijo na Itália**. Disponível em: < <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2015/08/energia-heliotermica-e-usada-na-producao-de-queijo-na-italia/26853> >. Acesso em Julho de 2019.

AUDIFRED, A.B.S. **Utilização de dispositivos termoeletrônicos para geração de energia elétrica em nanosatélites**. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

BANGERT, K. **Thermopowers**. *E-futures*, pp. 1-5. Abril de 2006.

BAHAROON, D.A; RAHMAN, H.A; OMAR, W,Z,W. **Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently**. – A review". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 41, pp. 996-1027.

BARROS, R.W. **Avaliação teórica e experimental do motor Stirling modelo solo 161 operando com diferentes combustíveis**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Disponível em: < <https://saturno.unifei.edu.br/bim/0030363.pdf> >. Acesso em Maio de 2020.

BENG, H.F. **Power Generation from Thermoelectric Cells by Using Solar Parabolic Concentration Dish**. Dissertação de Mestrado. REMIT University. Março de 2011. p.57.

BERGER, D. **Efeito da pressão na obtenção e nas propriedades óticas e sensoras de filmes finos à base de sno₂ com a adição de zno [report]**. Araraquara: 2013. Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2013. p. 21.

BERMEJO, M.R. **O nome e o símbolo dos elementos químicos**. Departamento de Química Inorgânica. Universidade de Santiago de Compostela. Disponível em: < http://www.enciga.org/files/boletins/58/Bermejo_y_Glez_O_Nome_e_o_simbolo_de_elemento.pdf >. Acesso em Dezembro de 2018.

BERTIN, A.J.O. **Análise de geração distribuída de eletricidade com tecnologia heliotérmica em usina sucroalcooleira como vetor de economia de bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo – USP. Acesso em Junho de 2020. Disponível em: < <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/74/74134/tde-02102017-112956/publico/ME7789712COR.pdf> >.

BOTAN, M.C.O. **Fundamentos da conversão termelétrica direta**. Editora e livraria Cabral. Página 17. Ano 2014.

BRANCALIAO, S.F.N. **Sistemas heliotérmicos: recurso solar, tecnologia e infraestrutura**. Universidade Federal de Brasília. Faculdade de tecnologia departamento de engenharia mecânica. Disponível em: < <http://bdm.unb.br/bitstream/10483/13562/1/2015NathanF.S.Brancaliao.pdf> >. Acesso em Setembro de 2019.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. Uma introdução. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 2002.

CARAM, R. **Estrutura e propriedade dos materiais**. Materiais cerâmicos. Unicamp. Disponível em: < <http://www.fem.unicamp.br/~caram/6.%20MATERIAIS%20CERAMICOS%20GRAD.pdf> >. Acesso em Dezembro de 2018.

CARVALHO, C.C. **Fontes heliotérmicas: um estudo sobre o funcionamento e o potencial de implementação no Brasil**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento acadêmico de eletrotécnica. Disponível em: < http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10100/1/CT_COELE_2016_1_23.pdf >. Acesso em Abril de 2020.

ENGENHARIA ELÉTRICA

CASSIO, C.C. **Fontes heliotérmicas: Um estudo sobre o funcionamento e o potencial de implementação no Brasil**. Disponível em: < http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10100/1/CT_COELE_2016_1_23.pdf >. Acesso em Setembro de 2019.

CASTELLANOS, L.S.M. **Modelagem de sistemas de geração de eletricidade a partir de energia solar utilizando pratos parabólicos e motores stirling**

(Dish/Stirling). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá – UNIFEL. Acesso em Novembro de 2018.

CASTRO, M.G. **Avaliação do valor da energia proveniente de usinas heliotérmicas com armazenamento no âmbito do sistema interligado nacional**. Dissertação (Mestrado). COOPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: < <http://antigo.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/castro.pdf> >. Acesso em Maio de 2018.

CAVALCANTI. **Geração Heliotérmica: Uma nova opção de energia limpa para o Brasil**. Artigo submetido ao VIII Congresso Brasileiro de Energia – CBE, a ser realizado no Rio de Janeiro (RJ), 30 de Novembro a 2 de Dezembro, 15p., 1999. Disponível em: < <http://www.fbds.org.br/IMG/pdf/doc-38.pdf> >.

CAVALLARO, F. **Sistemas hibridizados de energia solar concentrada (CSP). Classificação baseada em um algoritmo multi-critério difuso intuicionista**. Journal of Cleaner Production. Elsevier. journal homepage: www.elsevier.com/locate/jclepro.

CHANTRENNE, P; BARRAT, J.L. **Superlattices Microstruct.** 35, 173 (2004).

CHOI, Y; KIM, P; et al. **Effect of the carbon nanotube type on the thermoelectric properties of CNT/Nafi on nanocomposites**. OrgElectron2011;12:2120–5.

CLIQUE ARQUITETURA. **Vidro reflexivo**. Disponível em: < <https://www.cliquearquitetura.com.br/artigo/vidro-refletivo-ou-espelhado.html> > acesso em Fevereiro de 2019.

CONFERENCE PAPER. **ReflecTech Mirror Film Attributes and Durability for CSP Applications**. Disponível em: < [ReflecTech® Mirror Film Attributes and Durability for CSP Applications](#) >. Acesso em Julho de 2019.

CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólico Sérgio de s. Brito. **Coletores Solares**. Disponível em: < http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=561 >. Acesso em Novembro de 2018.

DABHIJ; TRAVADI.S. **Review on Design and Analytical Model of Thermoelectric Generator**. Departamento de engenharia mecânica. Universidade Tecnológica Gujarat. Ahmadabad, India. p.3.

DANIEL, S. **Irradiação**. Instituto de física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: < <https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/radiacao.htm> >. Acesso em Outubro de 2018.

DIONATA, C.C. **Radiação solar.** Disponível em: <<https://carlosdionata.wordpress.com/2014/12/09/radiacao-solar>>. Acesso em Setembro de 2018.

DUFFIE, J.A. **Solar Engineering of Thermal Processes.** Solar Energy Laboratory University of Wisconsin-Madison. New Jersey.

ECO HARMONIA. **Usina solar Stirling.** Disponível em: <<http://www.ecoharmonia.com/2010/09/inaugurada-usina-solar-stirling-de.html>>. Acesso em Maio de 2018.

ELARUSI, A. **Performance Prediction of Commercial Thermoelectric Generator Modules using the Effective Material Properties.** Departamento de engenharia mecânica e aeronáutica da Western Michigan University – WMU. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/276130460_Performance_Prediction_of_Commercial_Thermoelectric_Cooler_Modules_using_the_Effective_Material_Properties>. Acesso em Junho de 2020.

ENERGIA SOLAR. **Histórico do uso do Sol.** Disponível em: <<https://energiasolar2012.wordpress.com/historico-do-uso-do-sol/>>. Acesso em Dezembro de 2018.

ELSAYED, S.M., SARKER, R.A. ESSAM, D.L. An Improved Self-Adaptive Differential Evolution Algorithm for Optimization Problems, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 9, p 89-99, 2013.

FARICELLI, C. **Seguidor solar para sistemas fotovoltaicos.** Universidade de São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2008. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2008/Trabalhos%20 finais/TCC_040_2008.pdf>. Acesso em Julho de 2019.

G1. **Maior torre de energia solar do mundo é construída no deserto de Israel.** Disponível em: <<https://g1.globo.com/mundo/noticia/maior-torre-de-energia-solar-do-mundo-e-construida-em-deserto-de-israel.ghtml>>. Acesso em Maio de 2020.

GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2015. **CSP tools:** Comparar e aplicar ferramentas de planejamento para integrações de grade CSP no Brasil. Ministério Federal de Cooperação e Desenvolvimento Econômico (BMZ), Berlin, Alemanha. Disponível em: <https://www.daad.de/medien/the_nopa_case_-_reflections_and_achievements.pdf>. Acesso em Setembro de 2019.

GODART, C; GONC, A. P. LOPES, E. B; VILLEROY, B. **Role of Structures on Thermal Conductivity in Thermoelectric Materials,** in Veljko Zlati, Alex C. Hewson, (Ed.), Properties and Applications of Thermoelectric Materials, Springer,

Netherland. Disponível em: < https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-90-481-2892-1_2 >. Acesso em Fevereiro de 2018.

GONÇALVES, L.M. **Microsistema termoelectrico baseado em teluretos de bismuto e antimônio**. Tese de Doutorado. Disponível em: < <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/8171> >. Acesso em Novembro de 2018.

GORNI, E. **Bismuto**. Tabela periódica online. Disponível em: < http://www.tabela.oxygenio.com/outros_metalis/elemento_quimico_bismuto.htm >. Acesso em Dezembro de 2018.

GUERRA,B.D. **Síntese e modificação de nanofios de bi e bi₂+xte₃-y por implantação e irradiação iônica**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Disponível em: < http://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/7505/2/DIS_DANIELI_BORN_GUERRA_COMPLETO.pdf >. Acesso em Dezembro de 2018.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física 3: Eletromagnetismo**. 4ª edição. Editora LTC. Rio de Janeiro, 1996.

HARMAN, T. C; TRITT, M.T **Thermoelectric Materials, Phenomena, and Applications: A Bird's Eye View,**” MRS Bull., vol. 31, no. 03, pp. 188–198, Mar. 2006.

HILLHOUSE, H.W; TUOMINENMT. Microporous Mesoporous Matter. 2001;47:39.

IMHOFF. **Fontes e Tecnologias de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas**. Publicado pelo Laboratório de Fontes Renováveis de Energia (LABFONRES). Universidade de Brasília. Ano 1, p. 265-322, 2010. Disponível em: < <http://labfontes.ene.unb.br/geracao-distribuida/fontes-e-tecnologias-de-geracao-distribuida-para-atendimento-a-comunidades-isoladas> >. Acesso em Maio de 2020.

IVERSEN, B.B; Nolas,G.S, et al. **Why are clathrates good candidates for thermoelectric materials?** J Solid State Chem 2000;149:455–8.

KAMAL, W. A. **Solar Water Pumping: an analytical overview**. Engineering Journal of Qatar University. Qatar, v. 1, 1988. Disponível em: < <http://qspace.qu.edu.qa/bitstream/handle/10576/7914/06-88-1-09-fulltext.pdf?sequence=3> >.

KAKIMOTO, L.C. **Efeito Peltier-Seebeck: gerando eletricidade por diferença de temperatura**. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Física Gleb Wataghin. Disponível em:

<https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F609_2013_sem1/Luis_C_Siervo_F609_RF3.pdf>. Acesso em Outubro de 2018.

KHALED, T. Modelagem e pesquisa experimental de sistemas termoeletricos híbridos fotovoltaicos para conversão de energia solar altamente concentrada. Laboratory of Low Emission Vehicle, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China. homepage: www.elsevier.com/locate/solener >. Acesso em Dezembro de 2019.

KIPP e ZONEN. Piranômetro CM4. Disponível em: <<https://www.kippzonen.com/Product/10/CM4-Pyranometer#.Xnot3upKjIV>>. Acesso em Março de 2020.

KITAGAWA, H; WAKATSUKI, M. Temperature dependence of thermoelectric properties of Ni-dopedCoSb3. J PhysChemSolids2005;66:1635–9.

KREITH, FRANK; KREIDER, JAN F. Principles of Solar Engineering. McGraw-Hill. 1978.

LENOIR, B. Preparation of n-type bi–sb–te thermoelectric material by mechanical alloying. Laboratoire de Physique des Mate´riaux, UMR 7556 CNRS-UHP-INPL, Parc de Saurupt, Ecole des Mines 54042 Nancy, France.

LI, F. H. Microstructure and thermoelectric properties of p-type Bi–Sb–Te–Se thin films prepared by electrodeposition method. Sci. 255 (2009) 4225.

LODI, C. Perspectivas para a Geração de Energia Elétrica no Brasil Utilizando a Tecnologia Solar Térmica Concentrada. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPE/COPPE/UFRJ, 2011. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: < http://antigo.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/cristiane_lodi.pdf >. Acesso em Março de 2018.

LUNAZZI, J.J. Motor Stirling. Relatório fina. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Disponível em: <https://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2008/RenatoP-Llagostera_RF2.pdf>. Acesso em Maio de 2020.

MALAGUETA, C. M., 2012. Geração heliotérmica: princípios e tecnologia.

MAJUMDAR, A. Microstructure and thermoelectric properties of p-type Bi–Sb–Te–Se thin films prepared by electrode position method. 2004.

MATOS, R.M. **Desenvolvimento de um concentrador parabólico**. FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/60359/1/000134848.pdf>>. Acesso em Outubro de 2018.

MATSUURA, O. T. **Astronomia**: Uma visão geral do universo (2ª edição ed., pp. 81-102). São Paulo, SP. 2006.

MIRÉZ, J. **Simulacion de campo de colectores solares cilindro-parabólicos (CSCP) para generacion de calor a alta temperatura**. Universidad Nacional de Ingenieria. Disponível em :<<https://jmirez.files.wordpress.com/2013/07/diapositiva116.jpg>>. Acesso em Setembro de 2018.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Energia solar no Brasil e no mundo**. Disponível em : < <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17+-+Energia+Solar+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2015+%28PDF%29/4b03ff2d-1452-4476-907d-d9301226d26c;jsessionid=41E8065CA95D1FABA7C8B26BB66878C9.srv154> >. Acesso em Maio de 2019.

MONTALVAN, C. **Radiacion solar**. Meteorología y Climatología Ambiental. Disponível em: <<https://es.slideshare.net/cristhianyersonmontalvancoronel/radiacion-solar-46819078>>. Acesso em Outubro de 2018.

NOLAS, G.S; MORELLI, D.T. TRITT, T.M; KUTTERUDITES. **Aphonon-glass-electron crystal approach to advanced thermoelectric energy conversion applications**. Annu RevMater Sci 1999;29:89–116.

OLIVEIRA, K. **O Sol**. UFRGS. Universidade Federal do Rio Grande do sul. Disponível em: < <https://www.if.ufrgs.br/ast/solar/portug/sun.htm> >. Acesso em Novembro de 2018.

PENG, J; YANG, J; et al. **Preparation and characterization of Fe substituted CoSb₃ skutterudite by mechanical alloying and an nealing**. J AlloysCompd2004;381:313–6.

PEREIRA, C. NEYMAR. **Propriedades termoelétricas de filmes nanométricos de ligas de telúrio, bismuto, selenio e antimônio produzidos por magnetronsputtering DC**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/24514>>. Acesso em Outubro de 2018.

PHILIBERT, C; FRANKL, P; DOBROTKOVA, Z. **Technology roadmap: Concentrating Solar Power**. Internacional Energy Agency (IEA), 2010. Disponível em: < http://www.iea.org/papers/2010/csp_roadmap.pdf >.

PIERRAT, B. **Preparation of n-type bi-sb-te thermoelectric material by mechanical alloying**. Laboratoire de Physique des Matériaux, UMR 7556 CNRS-UHP-INPL, Parc de Saurupt, Ecole des Mines 54042 Nancy, France.

PILCH, M; MOLAK, A. **Resistivity switching induced in ferroelectric phase of PbTiO₃ studied by XPS and electric conductivity tests**, *J. Alloy. Compd.* Volume 586, 15 February 2014, Pages 488-498. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838813025188> >. Acesso em Novembro de 2018.

PINDADO, R. H. **Climatización Mediante Células Peltier**. 2008. 237 f. TCC (Graduação) Curso de Engenharia Industrial, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2008. Disponível em: <<http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/48c66604d0038.pdf>>. Acesso em: 29 maio 2015.

PORTAL SOLAR. **O que é uma usina solar**. Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/usina-solar.html> >. Acesso em Maio de 2019.

QINGDAO MIGO GLASS. **Torre Fresnel Linear Plano Espelho Solar Para CSP Heliostat**. Disponível em; < <http://pt.migoglass.net/solar-glass/tower-linear-fresnel-flat-solar-mirror-for-c.html> >. Acesso em Maio de 2019.

QIU, B. L. **Large thermal conductivity decrease in point defective Bi₂Te₃ bulk materials and superlattices** *Phys. Rev. B* 83, 035312 (2011).

RAGHEB, M. **Historical Perspective**. University of Illinois at Urbana-champaign,

Estados Unidos, 2011. Disponível em : < <https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20498ES%20Energy%20Storage%20Systems/Historical%20Perspective.pdf> >.

REMANN, F. **Energia heliotérmica**. Perspectivas para a Indústria Brasileira. Disponível em: < http://www.paranoaenergia.com.br/wp-content/uploads/2016/04/GIZ_Brasil_Heliotermica.pdf >. Acesso em Maio de 2020.

ROWE, M.D. **Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano**. Dezembro 2005, 1ª edição. Disponível em: < <https://www.crcpress.com/Thermoelectrics-Handbook-Macro-to-Nano/Rowe/p/book/9780849322648> >. Acesso em Dezembro de 2018.

RUBINGER, R.M; OLIVEIRA, A.F. **The effects of noises on metaheuristic algorithms applied to the PV parameter extraction problem**. *Solar Energy* 201 (2020) 420–436. www.elsevier.com/locate/solener.

SANO, S; MIZUCAMI, H. **Development of high-efficiency thermoelectric Power generation system.** *Komai'su technicalreport*;2003.vol.49,no.152.

SBC ENERGY INSTITUTE. **Concentrating Solar Power.** Disponível em: < https://energypedia.info/images/5/56/Concentrating_Solar_Power_-_Factbook.pdf >. Acesso em Fevereiro de 2019.

SCARPIN,M.L. **Análise termodinâmica de uma turbina a gás aeronáutica operando com metano.** *Revista Engenharia em Ação.* p.103. disponível em: < [file:///C:/Users/Aloizio/Downloads/92-2483-1-PB%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Aloizio/Downloads/92-2483-1-PB%20(1).pdf) >. Acesso em Maio de 2020.

SEVERINO, M.& OLIVEIRA, M. **Fontes e Tecnologias de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas.** Publicado pelo Laboratório de Fontes Renováveis de Energia (LABFONRES). Universidade de Brasília. Ano 1, p. 265-322, 2010. Disponível em: < <http://labfontes.ene.unb.br/geracao-distribuida/fontes-e-tecnologias-de-geracao-distribuida-para-atendimento-a-comunidades-isoladas> >. Acesso em Maio de 2020.

SHOUYUAN. H, XIANFAN XU. **Um conceito regenerativo para geração de energia termoeétrica.** *Applied Energy.* P.119-125. Elsevier. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/apenergy.

SILVA, L.P.L. **Desenvolvimento de um coletor solar cilíndrico parabólico para baixas e médias temperaturas.** Universidade Federal de Campina Grande. Dissertação de Mestrado. Disponível em: < <http://www.ppgem.ufcg.edu.br/arquivos/2015/LEONARDO%20PEREIRA%20DE%20LUCENA%20SILVA%202015.pdf> >. Acesso em Setembro de 2018.

SILVA, T.I. **Repositório institucional.** Universidade Federal da Bahia. Disponível em: < <https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/21397> >. Acesso em Agosto de 2018.

SINGH, B; SAOUD, A; REMELI, M. F; DING, L. C. Date, A. **Design and construction of a simple thermoelectric generator heat exchanger for power generation from salinity gradient solar pond.** *Jurnal Teknologi*, 76(5), 21-24.

SINGH.M. **Gerador termoeétrico.** *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* e-ISSN: 2278-1684,p-ISSN: 2320-334X, Volume 12, Issue 3 Ver. III (May. - Jun. 2015), PP 40-45 www.iosrjournals.org.

SCHERRER, S., CHEM. J. **Preparation of n-type bi-sb-te thermoelectric material by mechanical alloying.** Laboratoire de Physique des Matériaux, UMR 7556 CNRS-UHP-INPL, Parc de Saurupt, Ecole des Mines 54042 Nancy, France.

SNYDER, G. J; Toberer, E.S. **Complex thermoelectric materials**. Nat.Mater. vol. 7, no. 2, pp. 105–114, 2008.

SOUZA, J.R.S. **Projeto, construção e levantamento de desempenho de um concentrador solar cilíndrico parabólico com mecanismo automático de rastreamento solar**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de tecnologia Dissertação (Mestrado). 2008. Disponível em: < <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15531/1/JOSERSF.pdf> >. Acesso em Agosto de 2019.

TSALT,C; CHANG H,C. **Widely variable Seebeck coefficient and enhanced thermoelectric power of PEDOT:PSS films by blending thermal decomposable ammonium for mate**.Org Electron 2011;12:2159–64.

WANG, Y.C; LEE, K.H. **Fabrication and thermoelectric properties of heavily rare-earth metal-doped Sr O (SrTiO₃)_n (n=1,2)ceramics**. Ceram Int2008;34:849–52.

WATANABE,N; Nakayama,H. et al. **Effects of metal substitution on the electric and thermoelectric properties in (Ni_{1-x}M_x)Mn₂O₄ (M=Zn and Mg)**.ThermochimActa2012;532:56–9.

WENDLING, M. **Semicondutores**. Disponível em: < <http://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/1---semicondutores.pdf> >. Acesso em Dezembro de 2018.

WEER. **Energia solar térmica para produzir eletricidade. Sistema Disco Motor Stirling**. Disponível em: < <http://www.lawebdelasenergiasrenovables.com/energia-solar-termica-para-producir-electricidad-sistema-disco-motor/> >. Acesso em Junho de 2020.

WIKIPÉDIA. **Luminosidade**. Disponível em: < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Luminosidade> >. Página atualizada em Novembro de 2018. Acesso em Novembro de 2018.

YANG, R.G; CHEN,G. **A review of thermoelectrics research – Recent developments and potentialsforsustainableandrenewableenergyapplications**PhysRevB2004;69:195316.

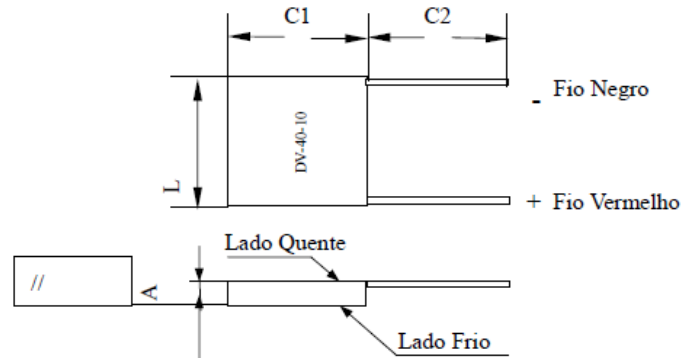
YIM, W.M. **Solid-State Electronics**. Volume 15, Issue 10, October 1972, Pages 1141-1144, IN3-IN4, 1145-1165, Elsevier. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038110172901736> >. Acesso em Novembro de 2018.

ANEXO I



Datasheet: DV-40-10

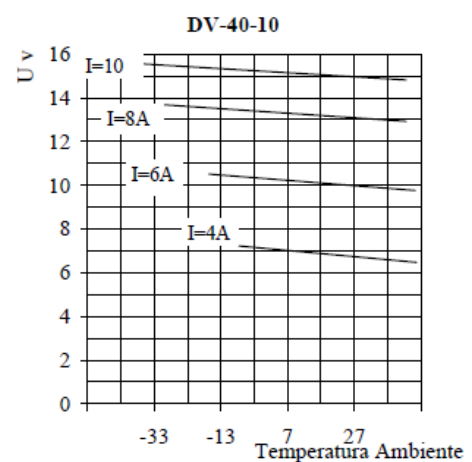
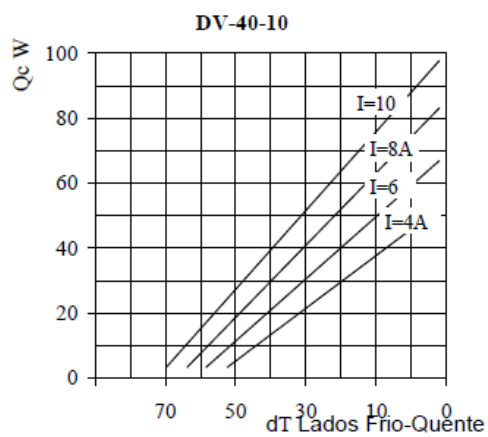
1.1 Diagrama



1.2 Dimensões e Especificações

C1 (mm)	L (mm)	A (mm)	C2 (mm)	Paralelismo
39.5±0.2	39.5±0.2	3.30±0.1	150±3	≤0.05

Pares	I _{max} (A)	V _{max} (V)	Q _{max} (w) dT = 0	dT _{max} (C) Q=0	R(Ω)
127	10	15.4	85.1	68	1.08±0.1



APÊNDICE I

Testes iniciais de temperatura com o primeiro concentrador solar

Dia	Horário (h)	Temperatura no foco (°C)	Irradiação Solar W/m ²
25/03/2019	08:00	0	184
25/03/2019	08:30	58,2	249
25/03/2019	09:00	59,6	257
25/03/2019	09:30	60,9	298
25/03/2019	10:00	154,1	872
25/03/2019	10:30	89,2	551
25/03/2019	11:00	159,9	955
25/03/2019	11:30	158,3	920
25/03/2019	12:00	158,9	929
25/03/2019	13:00	154,1	873
25/03/2019	13:30	152,8	820
25/03/2019	14:00	119,8	733
25/03/2019	14:30	98,1	601
25/03/2019	15:00	98,1	600
25/03/2019	15:30	98,1	600
25/03/2019	16:00	70,1	361
25/03/2019	16:30	60,8	295
25/03/2019	17:00	45,2	217
26/03/2019	08:00	58,2	356
26/03/2019	08:30	83,4	457
26/03/2019	09:00	92,1	560
26/03/2019	09:30	99,9	623
26/03/2019	10:00	110,2	698
26/03/2019	10:30	121,3	766
26/03/2019	11:00	150,1	831
26/03/2019	11:30	152,5	845
26/03/2019	12:00	154,2	871
26/03/2019	13:00	153,3	854
26/03/2019	13:30	119,5	787
26/03/2019	14:00	115,8	762
26/03/2019	14:30	112,6	699
26/03/2019	15:00	98,5	614
26/03/2019	15:30	91,1	526
26/03/2019	16:00	83,5	426
26/03/2019	16:30	65,5	309
26/03/2019	17:00	44,5	209
27/03/2019	08:00	68,6	338
27/03/2019	08:30	72,7	448
27/03/2019	09:00	88,8	548
27/03/2019	09:30	112,2	640
27/03/2019	10:00	119,3	718

27/03/2019	10:30	154,1	810
27/03/2019	11:00	154,3	829
27/03/2019	11:30	154,6	869
27/03/2019	12:00	154,7	863
27/03/2019	13:00	155,1	877
27/03/2019	13:30	67,9	321
27/03/2019	14:00	91,8	607
27/03/2019	14:30	92,1	675
27/03/2019	15:00	70,5	471
27/03/2019	15:30	67,8	320
27/03/2019	16:00	0	161
27/03/2019	16:30	0	87
27/03/2019	17:00	0	22
28/03/2018	08:00	46,3	251
28/03/2019	08:30	84,8	437
28/03/2020	09:00	92,1	533
28/03/2021	09:30	102,1	633
28/03/2022	10:00	111,9	715
28/03/2023	10:30	153,8	842
28/03/2024	11:00	92,9	579
28/03/2025	11:30	162,1	960
28/03/2026	12:00	161,1	939
28/03/2027	13:00	160,2	907
28/03/2028	13:30	126,1	796
28/03/2029	14:00	154,3	812
28/03/2030	14:30	0	102
28/03/2031	15:00	32,1	184
28/03/2032	15:30	0	99
28/03/2033	16:00	0	74
28/03/2034	16:30	0	70
28/03/2035	17:00	0	91
29/03/2019	08:00	68,3	360
29/03/2019	08:30	71,2	467
29/03/2019	09:00	91,6	562
29/03/2019	09:30	98,9	654
29/03/2019	10:00	119,9	729
29/03/2019	10:30	152,8	857
29/03/2019	11:00	69,1	371
29/03/2019	11:30	156,5	890
29/03/2019	12:00	156,3	883
29/03/2019	13:00	156,1	863
29/03/2019	13:30	155,6	829
29/03/2019	14:00	125,8	769
29/03/2019	14:30	124,2	709
29/03/2019	15:00	84,5	423
29/03/2019	15:30	44,2	204
29/03/2019	16:00	0	122
29/03/2019	16:30	0	98
29/03/2019	17:00	45,1	221

01/04/2019	15:00	120	690
01/04/2019	15:30	85	453
01/04/2019	16:00	95	533
02/04/2019	09:30	115	649
02/04/2019	10:00	120	693
02/04/2019	10:30	135	792
02/04/2019	11:00	74	411
02/04/2019	11:30	130	753