



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Doutorado

**GERADOR TERMELÉTRICO EM ESTADO SÓLIDO COM
AQUECIMENTO SOLAR E RESFRIAMENTO GEOTÉRMICO**

por

Carlos Henrique Alencar Almeida

*Tese apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção do
Grau de Doutor.*

João Pessoa – Paraíba

Fevereiro de 2024

CARLOS HENRIQUE ALENCAR ALMEIDA

**GERADOR TERMELÉTRICO EM ESTADO SÓLIDO COM
AQUECIMENTO SOLAR E RESFRIAMENTO GEOTÉRMICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, para obtenção do Grau de Doutor.

Orientador: Professor Dr. Cícero da Rocha Souto

Coorientador: Prof. Dr. Gilberto Augusto Amado Moreira

João Pessoa – Paraíba

Fevereiro de 2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A447g Almeida, Carlos Henrique Alencar.

Gerador termelétrico em estado sólido com aquecimento solar e resfriamento geotérmico / Carlos Henrique Alencar Almeida. - João Pessoa, 2024.
115 f. : il.

Orientação: Cícero da Rocha Souto, Coorientador:
Gilberto Augusto Amado Moreira.
Tese (Doutorado) - UFPB/PPGEM.

1. Gerador termelétrico. 2. Termeletricidade direta.
3. Aquecedor solar. 4. Resfriador geotérmico. 5.
Energia renovável. I. Souto, Cícero da Rocha. II.
Moreira, Gilberto Augusto Amado. III. Título.

UFPB/BC

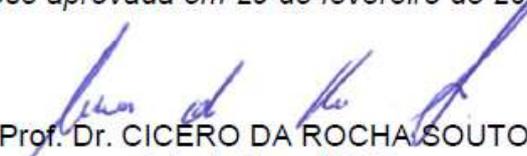
CDU 621.362(043)

GERADOR TERMELÉTRICO EM ESTADO SÓLIDO COM AQUECIMENTO SOLAR
E RESFRIAMENTO GEOTÉRMICO

por

CARLOS HENRIQUE ALENCAR ALMEIDA

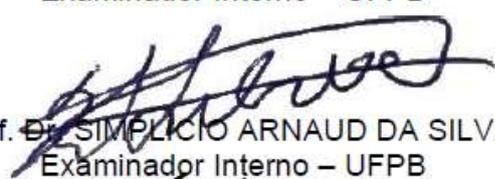
Tese aprovada em 29 de fevereiro de 2024


Prof. Dr. CICERO DA ROCHA SOUTO
Orientador – UFPB

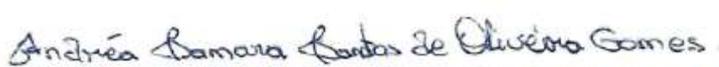

Prof. Dr. GILBERTO AUGUSTO AMADO MOREIRA
Coorientador - UFPB

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE MAURICIO ALVES DE MATOS GURGEL
Data: 05/03/2024 21:40:23-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. JOSÉ MAURÍCIO ALVES DE MATOS GURGEL
Examinador Interno – UFPB


Prof. Dr. SIMPLICIO ARNAUD DA SILVA
Examinador Interno – UFPB


Prof. Dr. JEAN PIERRE VERONESE
Examinador Externo – UFPB


Profa. Dra. ANDREA SAMARA SANTOS DE OLIVEIRA GOMES
Examinadora Externa – IFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda a minha família, para servir de exemplo e inspiração pela busca de conhecimento e soluções para um mundo melhor.

Dedico a minha esposa e filhos pela compreensão e paciência.

Dedico à memória de minha mãe Alda, a quem prometi desde criança que seria “Doutor”, sendo então o primeiro de toda a família a alcançar este grau.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Cicero por aceitar o tema e durante dez anos orientar com eficiência, responsabilidade, paciência e liderança.

Ao coorientador Gilberto pelos conhecimentos agregados ao trabalho e pelas correções necessárias no curso da pesquisa.

Aos professores do programa pela excelência.

Aos colegas de laboratório, em especial o Alysson pelas contribuições diretas e indiretas.

Ao IFPB pela política de incentivo a capacitação.

À minha esposa Jessica pelo apoio incondicional.

GERADOR TERMELÉTRICO EM ESTADO SÓLIDO COM AQUECIMENTO SOLAR E RESFRIAMENTO GEOTÉRMICO

RESUMO

Na busca por geração de energia elétrica com alto grau de sustentabilidade e potencial de desenvolvimento regional para o Nordeste do Brasil, o uso do Sol para geração de energia é extremamente considerável, devido aos altos índices de radiação Solar desta região do país. Esta pesquisa apresenta uma proposta de gerador de energia elétrica que se utiliza do fenômeno da termoeletricidade, transformando diferença de temperatura em potência elétrica, usando aquecimento solar e resfriamento geotérmico para obtenção da diferença de temperatura necessária para seu funcionamento. Foram desenvolvidas simulações por meio de métodos de volumes finitos, as quais possibilitaram a análise do comportamento térmico individualizado de cada componente do projeto. Adicionalmente às simulações, foram confeccionados protótipos com o propósito de replicar o funcionamento do modelo proposto em condições simuladas por meio de dispositivos capacitados a reproduzir os mesmos cenários encontrados na literatura especializada referente ao desempenho de cada fenômeno. Os resultados experimentais foram monitorados por sistema de aquisição de dados e análise termográfica. Por fim, o sistema composto por associação de quatro células termelétricas alcançou valores de potência elétrica de 281 W/m^2 entregues a uma carga resistiva de $4,3 \text{ Ohms}$.

Palavras chave: termoeletricidade direta, aquecedor Solar, resfriador geotérmico, energia renovável.

SOLID-STATE THERMOELECTRIC GENERATOR WITH SOLAR HEATING AND GEOTHERMAL COOLING

ABSTRACT

In the search for electric power generation with a high level of sustainability and regional development potential for the Northeast of Brazil, the use of the Sun for energy generation is extremely considerable, due to the high levels of solar radiation in this region of the country. This research presents a proposal for an electric power generator that uses the phenomenon of thermoelectricity, transforming temperature difference into electrical power, using solar heating and geothermal cooling to obtain the temperature difference necessary for its operation. Simulations were developed using finite volume methods, which allowed the analysis of the individualized thermal behavior of each component of the project. In addition to the simulations, prototypes were made with the purpose of replicating the operation of the proposed model under simulated conditions by means of devices capable of reproducing the same scenarios found in the specialized literature regarding the performance of each phenomenon. The experimental results were monitored by a data acquisition system and thermographic analysis. Finally, the system composed of an association of four thermoelectric cells reached electrical power values of 281 W/m² delivered to a resistive load of 4.3 Ohms.

Keywords: direct thermoelectricity, Solar heater, geothermal chiller, renewable energy.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 APRESENTAÇÃO	11
1.1. INTRODUÇÃO.....	11
1.2. MOTIVAÇÃO.....	11
1.3. OBJETIVOS.....	12
1.3.1 OBJETIVO GERAL.....	12
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.4. CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA	13
1.5. PRODUÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA.....	13
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. INTRODUÇÃO.....	15
2.2. ESTADO DA ARTE.....	15
2.2.1 GERADOR TERMELÉTRICO.....	16
2.2.2 AQUECIMENTO POR ENERGIA SOLAR.....	30
2.2.3 RESFRIAMENTO PASSIVO	36
2.2.4 PRINCIPAIS TRABALHOS.....	42
2.3. CONCEITOS FUNDAMENTAIS - TERMELETRICIDADE	44
2.3.1 HISTÓRIA.....	44
2.3.2 DESCRIÇÃO ANALÍTICA	48
2.4. ENERGIA HELIOTÉRMICA (TERMO SOLAR).....	50
2.4.1 ANÁLISE NUMÉRICA	54
2.5. ENERGIA GEOTÉRMICA.....	57
2.5.1 ANÁLISE NUMÉRICA	58
2.6. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	60
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
3.1. IDEIA INICIAL.....	62
3.2. MODELO ESTUDADO	63
3.3. EMULAÇÃO DO MODELO PRINCIPAL.....	64
3.4. MODELO SIMPLIFICADO	67
3.5. Simulação do modelo simplificado	68
3.6. VOLUMES FINITOS	69

3.7.	SIMULAÇÃO DO MODELO PRINCIPAL	71
3.8.	SIMULAÇÃO DO SISTEMA GEOTÉRMICO.....	72
3.9.	SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR.....	75
3.10.	SIMULAÇÃO DE MÓDULO TERMELÉTRICO	76
3.11.	DEFINIÇÃO DA ESPESSURA DA MALHA	78
3.12.	VISÃO GERAL DA SIMULAÇÃO.....	79
3.13.	CONDIÇÕES DE CONTORNO	80
3.14.	ESTUDO DE CASO	81
CAPÍTULO 4 RESULTADOS		83
4.1.	SIMULAÇÃO DO MODELO SIMPLIFICADO	83
4.2.	SIMULAÇÃO DO MODELO PRINCIPAL	84
4.3.	SIMULAÇÃO DO SISTEMA GEOTÉRMICO.....	85
4.4.	SIMULAÇÃO DO COLETOR SOLAR PLANO	86
4.5.	SIMULAÇÃO DO MÓDULO TERMELÉTRICO.....	87
4.6.	VISÃO GERAL DAS SIMULAÇÕES	88
4.7.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO MODELO SIMPLIFICADO	89
4.8.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO MODELO PRINCIPAL	92
4.9.	AQUISIÇÃO DE DADOS	93
4.10.	ESTUDO DE CASO	97
4.11.	COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÃO E ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	99
4.12.	DESEMPENHO DO SISTEMA.....	100
CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO.....		101
5.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
APÊNDICE.....		111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Relação da eficiência com figura de mérito para máquinas e geradores termelétricos.	16
Figura 2 - Modelo de célula termelétrica com alta concentração térmica.	17
Figura 3 – Esquema de um sistema termelétrico Solar híbrido.	17
Figura 4 - (a) célula termelétrica sob concentrador óptico; (b) diagrama de blocos conceitual.	18
Figura 5- Modelo proposto pelo autor com melhor circulação de calor. a) modelo esquemático; b) modelo real.	19
Figura 6 - Distribuição elétrica de um veículo de combustão interna.	20
Figura 7 - (a) estrutura completa; (b) detalhe do absorvedor Solar (c) Estrutura do dispositivo termelétrico.	21
Figura 8- (a) Gerador Termelétrico com Concentrador Solar; (b) parte primária do gerador, com 6 módulos em série; (c) desenho esquemático da secção transversal do componente primário.	22
Figura 9 - Foto e esquema	23
Figura 10 – Esquema da estrutura.	24
Figura 11 – a) Visão geral do concentrador e da célula; b) visão explodida da célula.	25
Figura 12 - Resfriamento com spray de água (Esquerda); Resfriamento com água líquida.	26
Figura 13 - Ilustração da estrutura com diagrama de blocos.	27
Figura 14 - Esquema de funcionamento da estrutura.	28
Figura 15 – Sistema de geração de energia por célula eletroquímica com aquecimento Solar e resfriamento geotérmico.	29
Figura 16 – Estrutura híbrida de coletor Solar plano com dispositivos termoelétricos.	30
Figura 17- (a) Foto do aparato experimental; (b) Perfil padrão do concentrador; (c) Perfil simplificado do concentrador.	31
Figura 18 - Foto do sistema com pirâmide.	32
Figura 19 - Foto da configuração experimental.	33
Figura 20 - Foto da estrutura com discriminação dos componentes.	34

Figura 21 - (a) Projeto da estrutura; (b) Desempenho sob convecção natural e convecção forçada.	35
Figura 22 – Estação estática de concentrador Solar do tipo calha parabólica.	36
Figura 23 - (a) Diagrama da estrutura; (b) Carga térmica da edificação; (c) Performance da bomba de calor usada no experimento.	37
Figura 24 - Diagrama do sistema com exaustor geotérmico em espiral.....	38
Figura 25 - Diagrama da estrutura; Comportamento da temperatura a profundidades diferentes (direita).....	39
Figura 26 - Fotos de todo o sistema.....	40
Figura 27 - (a) Configuração experimental; (b) Tubulação subterrânea; (c) Diagrama; (d) Gráfico da temperatura.	41
Figura 28 – Sistema de resfriamento geotérmico para painel fotovoltaico.	42
Figura 29 – Adaptação do esquema simplificado do efeito Seebeck para fornecimento de energia elétrica a uma carga elétrica - conceito básico	46
Figura 30 – Esquema simplificado do efeito Seebeck em junção bimetálica de materiais semicondutores, conforme modelos atuais	47
Figura 31– Concentradores usados em usinas no mundo.....	52
Figura 32- Estação de pesquisa heliotérmica da UFSC.....	52
Figura 33- Primeira usina heliotérmica do Brasil. Rosana, São Paulo.....	53
Figura 34 – Esquema simplificado de um sistema geotérmico	57
Figura 35- Esboço da estrutura.....	63
Figura 36– Fluxograma de associação de tecnologias com identificação de fluxo.....	64
Figura 37– Foto da montagem da estrutura do núcleo do modelo principal.	65
Figura 38– Circuito elétrico equivalente da associação de geradores termelétricos.	65
Figura 39– Estrutura de análise experimental.	66
Figura 40 – Versão simplificada do modelo.....	67
Figura 41 – Desenho computacional do modelo simplificado.	69
Figura 42– Desenho computacional simplificado para simulação.	70
Figura 43– Desenho do modelo proposto.....	71
Figura 44 – Desenho computacional do modelo simplificado.	73
Figura 45 – Detalhe da malha.....	74
Figura 46 – Desenho computacional do coletor Solar plano.....	75
Figura 47 – Detalhe da malha para o desenho do coletor Solar plano.	76

Figura 48 – Detalhe da malha para o desenho do coletor Solar plano.	77
Figura 49 – Interação conceitual entre as simulações.	80
Figura 50– Resultado de simulação do comportamento do fluido passando pela estrutura.	83
Figura 51– Modelo computacional do núcleo do modelo principal.	85
Figura 52– Comportamento térmico do sistema geotérmico.	86
Figura 53– Resultado da simulação do coletor Solar plano.	86
Figura 54– Modelo computacional do módulo termelétrico. Variação de temperatura (a). Densidade de corrente elétrica (b)	87
Figura 55 – Interação conceitual entre as simulações.	88
Figura 56– registro termográfico (esquerda) e fotografia comum correspondente (direita).	89
Figura 57– Temperaturas nos terminais de circulação de fluido e a diferença de temperatura.	90
Figura 58 – Tensão e Potência elétricas nos terminais do dispositivo termelétrico em relação à Diferença de temperatura entre as faces.	92
Figura 59– Análise termográfica do sistema em pleno funcionamento (foto tirada da tela da câmera termográfica).	93
Figura 60– Comportamento térmico dos fluidos passando pela estrutura.	94
Figura 61– Gráficos da tensão e da potência elétricas.	96
Figura 62– Comportamento térmico de coletor Solar plano convencional em relação à radiação Solar.	97
Figura 63– Análise gráfica do comportamento do sistema em condições semelhantes a um dia típico.	98
Figura 64– Captura de tela do supervisor do sistema de aquisição durante o experimento (às 13:22 h).	111
Figura 65– Captura de tela da interface do sistema de aquisição de dados em pleno funcionamento.	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das temperaturas encontradas na revisão bibliográfica em ordem cronológica.	43
Tabela 2 – Trabalhos com resultados relevantes para esta pesquisa.	44
Tabela 3- Análise cronológica de pesquisas sobre termoelectricidade (adaptado de (GOUPIL, 2016)).....	45
Tabela 4– Potencial de Nacionalização dos equipamentos para geração Solar (RETORTA et al., 2018).	51
Tabela 5- Condições de contorno configuradas no Ansys® CFX.....	70
Tabela 6 – Variações de valores de condições de contorno.	74
Tabela 7 – Composição do elemento semiconductor tipo P usado na simulação de uma célula termelétrica (tabela obtida diretamente do programa de computador).	76
Tabela 8 – Teste de malha.	78
Tabela 9 – Comparação de valores da simulação e da análise experimental.	99
Tabela 10 - Resumo das capacidades de geração termelétrica encontradas na revisão bibliográfica em comparação com o trabalho atual.	100

CAPÍTULO 1

APRESENTAÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho é apresentado o estudo de um gerador de energia elétrica movido a termoeletricidade direta, onde a diferença de temperatura necessária para excitação do gerador é obtida de forma passiva através de aquecedor Solar e resfriador geotérmico.

1.2. MOTIVAÇÃO

O nordeste brasileiro possui um déficit histórico de desenvolvimento em relação às demais regiões (PNUD, IPEA, 2016). Tendo em vista que as maiores riquezas do país são oriundas de séculos de produção agropecuária, é de se esperar que a região com maior média anual de irradiação Solar direta tenha maior dificuldade em competir em produtividade agrícola. O excesso de radiação solar, aliado a outros fatores, faz com que a terra entre em processo de desertificação. Cerca de 22% do Trópico Semiárido Brasileiro foi considerada desertificada pelo INSA (Instituto Nacional do Semiárido). Todavia, nos últimos anos, esta mesma característica passou a ser vista como potencial de geração de energia fotovoltaica. Se comparado com outros países já avançados na disseminação desta tecnologia, este potencial é ainda mais significativo (ALMEIDA, Carlos Henrique Alencar *et al.*, 2019).

A energia fotovoltaica requer em sua produção tecnologias ainda não consolidadas no Brasil, tornando difícil sua nacionalização, tendo em vista a ausência de políticas de fomento à reindustrialização do país (até agora). Embora nos últimos anos o aumento da procura por esta tecnologia tenha favorecido a importação e melhorado o tempo de retorno do investimento, alguns legisladores vêm buscando formas de taxar o excedente de produção da geração distribuída (PEREIRA; ANDRADA, 2020). Nesse contexto político o consumidor pode se sentir menos motivado a adesão a esta tecnologia.

Porém, o fenômeno fotovoltaico não é a única forma de obter energia elétrica proveniente da energia Solar. Existem outras tecnologias que utilizam a energia do Sol para

produzir elevadas temperaturas, impulsionando turbinas da mesma forma que outras usinas de combustão o fazem (ALMEIDA, Carlos Henrique Alencar *et al.*, 2019). Porém, estas usinas não são viáveis em pequeno porte, tornando quase inconcebível sua utilização para geração distribuída ou ainda consumidores residenciais/comerciais.

Paralelamente, um assunto impossível de ignorar é a ascensão do mercado de veículos elétricos que propõe um aumento significativo da demanda por energia elétrica no mundo inteiro (TOSIN; KURODA, 2019). Embora a mudança de tecnologia dos veículos seja promissora para a redução de emissão de gases poluentes, gerar energia elétrica para atender esta demanda pode ser equivalentemente prejudicial, caso o setor tenha que recorrer a tecnologias pouco sustentáveis.

Perante tais contextos, acumulam-se as seguintes afirmações que motivaram esta pesquisa:

- é preciso gerar mais energia elétrica para atender as demandas emergentes;
- as novas tecnologias devem produzir energia elétrica de forma limpa, renovável e sustentável;
- a fonte de energia limpa mais abundante no Nordeste do Brasil é a energia Solar;
- para o desenvolvimento socioeconômico do país, é necessário que haja mais pesquisa sobre tecnologias com produção e recursos nacionais;
- há uma demanda crescente de geração distribuída.

Destas afirmações surge a pergunta: existe uma forma de gerar energia elétrica proveniente da energia Solar, capaz de atender uma demanda de geração distribuída, com baixo custo inicial, fácil implementação e grande percentual de nacionalização na sua produção?

Uma possibilidade de resposta a esta pergunta é a TERMOELETRICIDADE.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um gerador de energia elétrica sob o princípio da termoeletricidade, combinando células termelétricas, aquecimento Solar e resfriamento geotérmico.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para a obtenção deste objetivo, foram adotados os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um modelo numérico que associe concentração Solar e resfriamento geotérmico para geração de energia elétrica por termoeletricidade;
- Desenvolver um protótipo de gerador termelétrico sob emulação de condições de contorno semelhantes à literatura;
- Verificar comportamento dinâmico da temperatura do sistema simulado em comparação com o sistema experimental;
- Analisar o comportamento elétrico do módulo termelétrico sob as condições estabelecidas.

1.4. CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

Trata-se de um projeto multidisciplinar de baixa complexidade, com potencial de inovação nos seguintes aspectos:

- Sistema de geração de energia elétrica através do fenômeno da termoeletricidade, utilizando fontes naturais de energia térmica;
- Aproveitamento da energia Solar para aquecimento de fluido com finalidade de produção de energia elétrica por conversão direta;
- Utilização de sistema geotérmico para resfriamento passivo em sistemas de geração de energia elétrica;
- Combinação das tecnologias de aquecimento Solar, resfriamento geotérmico e termoeletricidade em um mesmo sistema de geração de energia elétrica.

1.5. PRODUÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

Durante o desenvolvimento desta pesquisa foram publicados trabalhos científicos em periódicos, congresso e também um depósito de patente, conforme lista a seguir.

ALMEIDA, C. H. A.; SOUTO, C. Da R.; MOREIRA, G. A. A. **GERADOR TERMELÉTRICO EM ESTADO SÓLIDO COM AQUECIMENTO SOLAR E RESFRIAMENTO GEOTÉRMICO**. Depositante: UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA (BR/PB) / INSTITUTO FEDERAL DA PARAÍBA (BR/PB). BR102022020524-8. Brasil, 2022.

ALMEIDA, C. H. A. *et al.* Solid State Thermoelectric Generator (Ssteg) - a Renewable Passive Heat Source. **International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering**, 2022. v. 10, n. 10, p. 15–21.

ALMEIDA, C. H. A. *et al.* **Solid State Thermoelectric Power Generator with passive heating and cooling**. Journal of Engineering Research, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100114>>. Acesso em: 12 jun. 2023.

ALMEIDA, C. H. A. *et al.* **Autonomous monitoring system for water supply networks: a theoretical concept**. In: DECK GRAFICA (Org.). Technical proceedings of the I Seminary on Scientific Writing. 1. ed. João Pessoa, Pb: Camara Brasileira do Livro, 2023, p. 13–31.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é aprofundar os estudos sobre os elementos necessários para a viabilização de um sistema híbrido de geração de energia elétrica envolvendo tecnologias de resfriamento e aquecimento com conversão direta de transferência de calor em energia elétrica.

Embora os temas abordados possuam uma trajetória de séculos de pesquisa e desenvolvimento, ainda apresentam desafios e oportunidades para inovação e otimização. Desta forma, esta revisão aborda publicações recentes, onde o comportamento dos fenômenos está mais bem discriminado, possuem análise computacional e as informações estão bem representadas por ilustrações, simulações e análise experimental contextualizada.

Este texto apresenta uma pesquisa sobre geração de energia elétrica usando módulos termelétricos em estado sólido, concentração Solar e resfriamento geotérmico. Os temas são abordados separadamente, com base em artigos científicos que discutem as estratégias, os fluidos e as temperaturas envolvidos em cada processo.

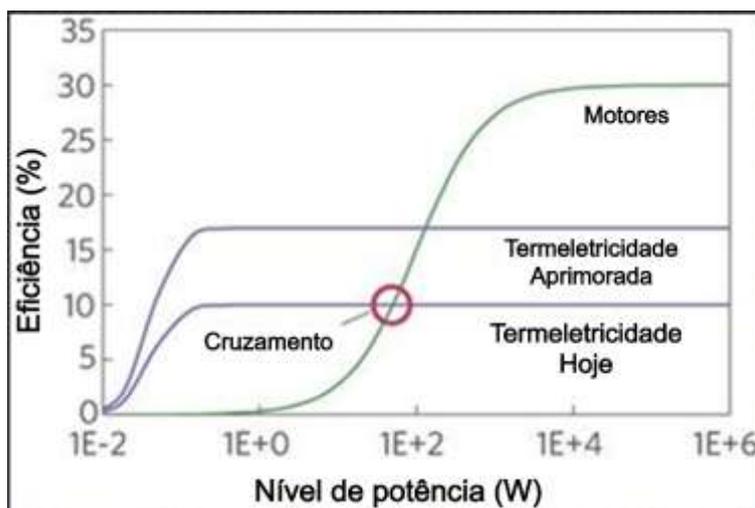
2.2. ESTADO DA ARTE

No primeiro tema, são analisados artigos que se utilizam do fenômeno da termelétricidade direta para conversão de fluxo de calor em eletricidade. No segundo tema, são examinados artigos que empregam diferentes sistemas de concentração Solar para aquecimento de fluido. No terceiro tema, são revisados artigos que propõem técnicas de resfriamento geotérmico, para reduzir a temperatura de ambientes ou equipamentos. Os resfriadores são aplicados desde situações de conforto térmico até otimização de sistemas de geração de energia elétrica.

2.2.1 GERADOR TERMELÉTRICO

(VINING, 2009) O autor faz uma ampla revisão até o ano de sua publicação e conclui que o desempenho de geradores termelétricos não alcançaria a eficiência de geradores com turbinas, enquanto sua tecnologia não apresentasse figura de mérito (ZT) superior a 4. A Figura 1 mostra a relação entre eficiência e potência, comparando máquinas com geradores termelétricos atuais e aprimorados.

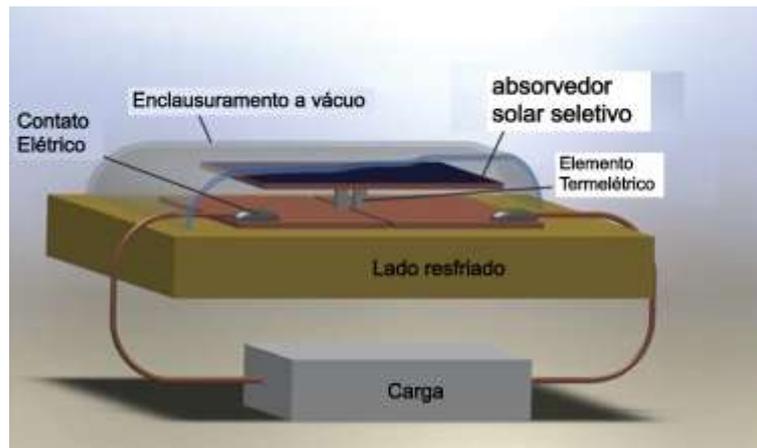
Figura 1 Relação da eficiência com figura de mérito para máquinas e geradores termelétricos.



Fonte: adaptado de (VINING, 2009)

(KRAEMER *et al.*, 2011) Os autores propõem um modelo de célula termelétrica composta por uma única junção de elementos termelétricos enclausurada dentro de um tubo evacuado. Com esta configuração, o sistema apresenta uma figura de mérito (ZT) de quase 2, uma eficiência de quase 14 % quando há uma concentração óptica de 10 vezes, com temperatura de aproximadamente 300 °C. Figura 2 mostra um esboço do modelo desenvolvido, onde é possível observar uma base referente ao lado frio, seguido dos contatos elétricos do dispositivo, tendo em sua parte superior um módulo fotovoltaico. O modelo está enclausurado em um recipiente de vidro evacuado.

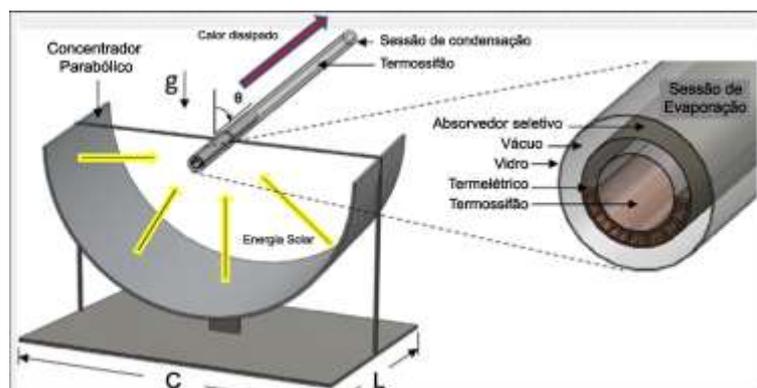
Figura 2 - Modelo de célula termelétrica com alta concentração térmica.



Fonte: adaptado de (KRAEMER *et al.*, 2011)

(MILJKOVIC; WANG, E. N., 2011) O artigo trata da modelagem e otimização de um sistema Solar híbrido que usa um termosifão para transferir calor. Um espelho parabólico concentra energia Solar em uma superfície seletiva coberta por dispositivo termelétrico, gerando eletricidade. Após o dispositivo termelétrico, tem um termosifão que extrai o calor da superfície fria do módulo TE e conduz o calor para outras aplicações. Foram feitos estudos com módulos de bismuto-telúrio e de silício-germânio em interação com outras combinações de fluidos. Os testes consideraram temperaturas de aproximadamente 25 a 1000 °C, bem como concentração Solar de 1 a 100 vezes. A melhor condição foi a 100x, 500 °C com eficiência de aproximadamente 52 %. A Figura 3 mostra um recorte do modelo proposto, contendo um concentrador parabólico redirecionando a luz para um tubo evacuado. No detalhe, está a sobreposição dos módulos termelétricos sobre a superfície do termosifão.

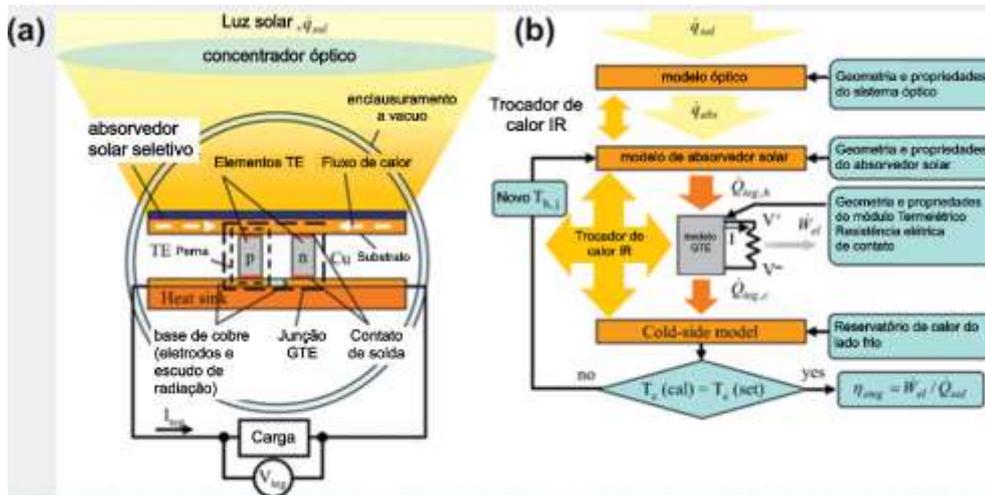
Figura 3 – Esquema de um sistema termelétrico Solar híbrido.



Fonte: adaptado de (MILJKOVIC; WANG, E. N., 2011)

(KRAEMER *et al.*, 2012) O trabalho consiste em um modelo de Gerador Termelétrico Solar, composto por uma única junção à base de bismuto-telurio, compreendido entre uma superfície absorvedora seletiva Solar, eletrodos de cobre, enclausurado em um tubo de vidro evacuado. Os autores concluíram que a performance do STEG (*Solar Thermoelectric Generator*) é independente do volume do material termelétrico, de forma que o custo deste é desprezível em comparação com o custo total do sistema. Concluem também que a geometria do módulo termelétrico pouco depende da temperatura do lado frio, mas depende principalmente da incidência de radiação Solar. Embora a eficiência do sistema de geração de energia elétrica chegue a 5% em determinadas circunstâncias, quando associado a uma produção de água aquecida, o sistema se torna viável para uso doméstico. A Figura 4 traz um esboço do modelo objeto do trabalho, onde é possível destacar que, neste caso, o módulo termelétrico se encontra no interior do tubo evacuado, diferentemente do trabalho anterior.

Figura 4 - (a) célula termelétrica sob concentrador óptico; (b) diagrama de blocos conceitual.

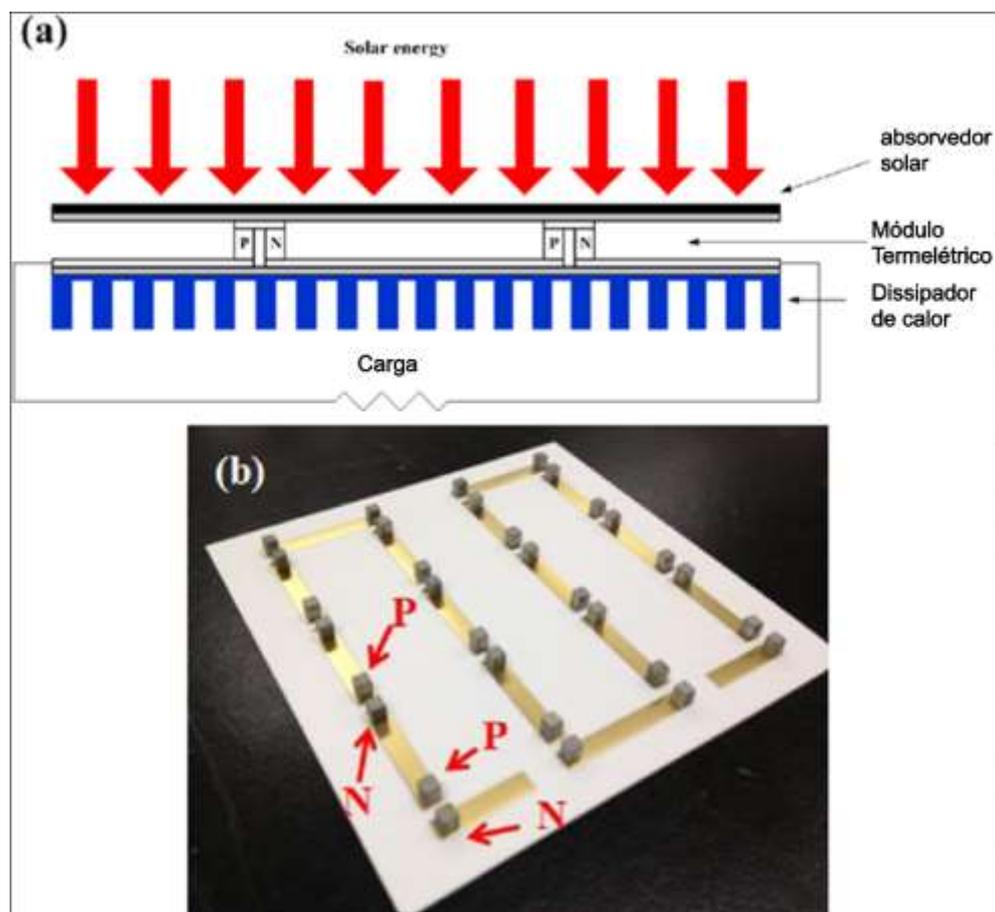


Fonte: adaptado de (KRAEMER *et al.*, 2012)

(CHEN, W. H. *et al.*, 2014) Os autores consideraram três diferentes formas geométricas para construção do módulo através de simulação e análise numérica, levou em consideração as propriedades térmicas dos módulos comerciais e traçou um modelo tridimensional com elementos finitos para chegar ao modelo em questão. Utilizou uma estrutura que favorecesse uma convecção forçada, onde tal variação de transferência de calor incrementa a performance. Dos três elementos testados, o menor, com área de 90x90 mm², teve uma eficiência acima de 4%. Também afirma o autor que resfriamento utilizando água

é mais eficiente que utilizando ar. O modelo ultrapassou o valor de figura de mérito $ZT = 1$ quando chegou a uma temperatura entre 80 e 120 °C. O autor conclui que a potência é incrementada quando aumenta a área do substrato. O menor elemento obteve a melhor performance. A Figura 5 traz um esboço de uma visão lateral do modelo proposto (a), seguido de uma fotografia da superfície onde estão acomodados os semicondutores (b).

Figura 5- Modelo proposto pelo autor com melhor circulação de calor. a) modelo esquemático; b) modelo real.

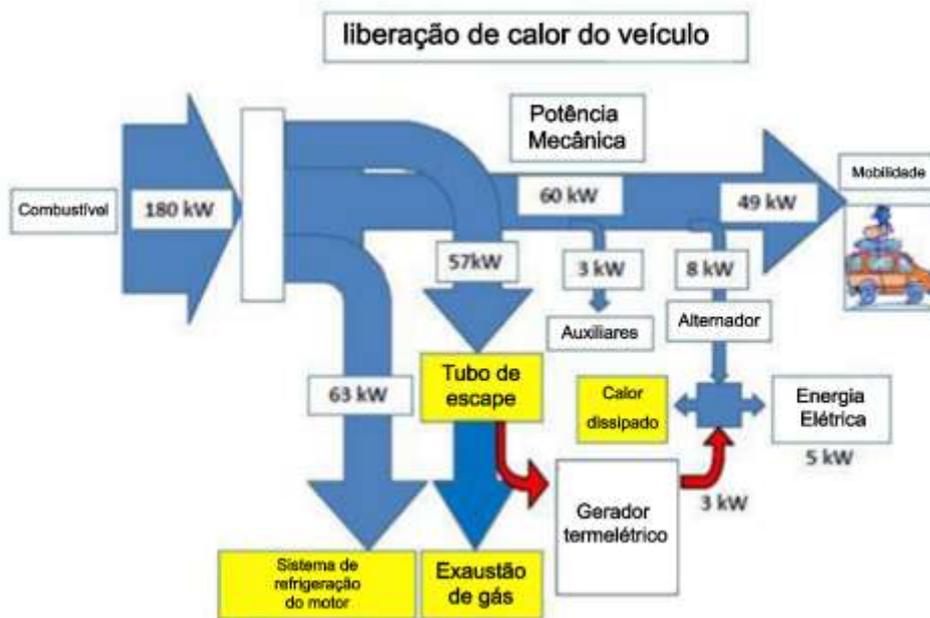


Fonte: adaptado de (CHEN, W. H. *et al.*, 2014)

(AFONSO, 2014) O autor apresenta um estudo sobre a utilização da termoeletricidade para recuperação de calor em um automóvel à combustão. Considerou-se a potência de um automóvel de 100 kW, com um rendimento de 25%, mais de 15 kW de energia térmica estão disponíveis nos gases de escape, sendo o resto perdas no circuito de arrefecimento e outras perdas térmicas, conforme figura. O autor faz uma boa revisão histórica (1920). Aponta ainda produtos inseridos no mercado já na década de 90, como o modelo BMW 530i. Dentre os benefícios apontados, destaca-se uma capacidade de

economia de combustível em torno de 10%. A Figura 6 mostra um diagrama de distribuição de potência desde a introdução do combustível até a conversão em movimento, passando pelo calor usado no referido trabalho.

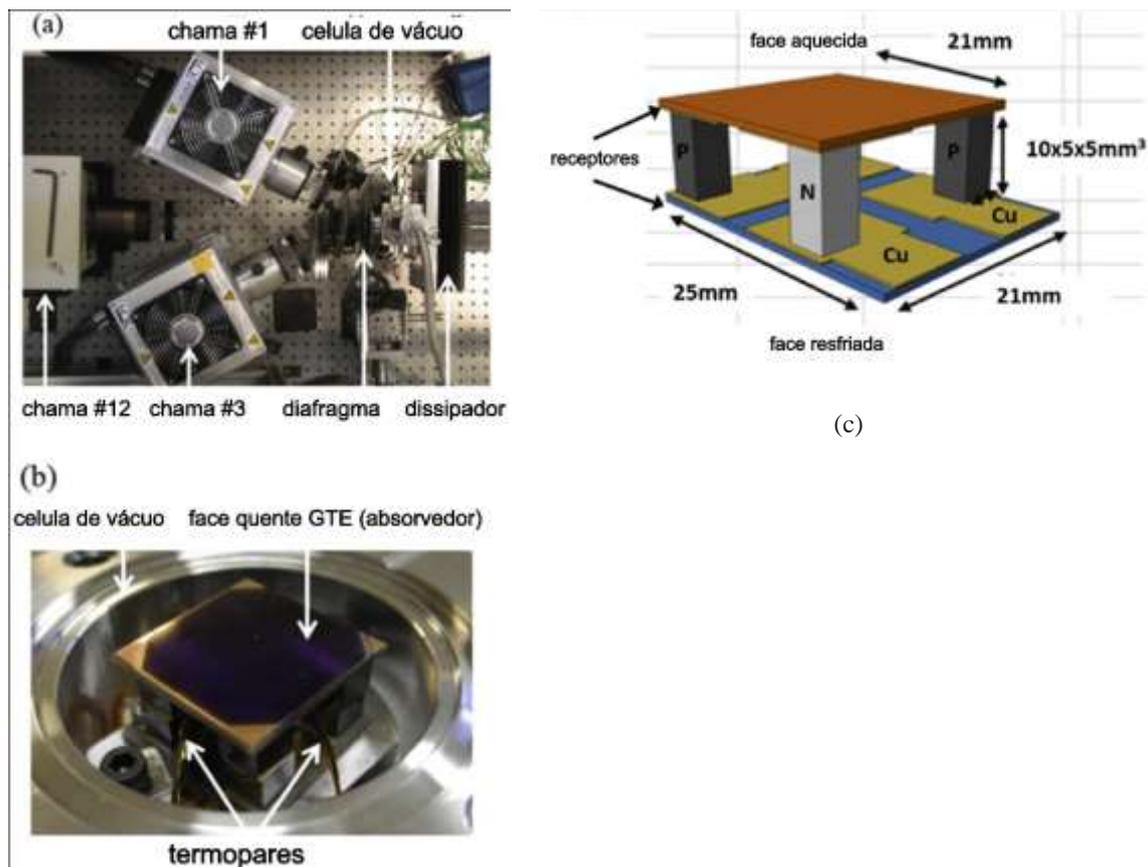
Figura 6 - Distribuição elétrica de um veículo de combustão interna.



Fonte: adaptado de (AFONSO, 2014)

(PEREIRA *et al.*, 2015) O artigo trata de um gerador termelétrico por concentração Solar, sob uma concentração de 100 vezes, atingindo temperaturas de até 450 °C. É apresentada uma caracterização em laboratório com módulos à base de Si80Ge20 acoplados a um absorvedor seletivo e um simulador de concentração Solar. O projeto foi desenvolvido com a meta de validar um modelo físico cuja performance suportasse elevadas temperaturas. Os autores projetaram um dispositivo, onde cada parâmetro da figura de mérito foi analisado separadamente. Os autores concluíram que o sistema de concentração Solar promoveu um rendimento de 1,6%, onde o dispositivo termelétrico teve rendimento de 3%. A potência atingida pelo dispositivo foi de 500 mW a uma diferença de temperatura de 400 °C. A Figura 7 mostra três destaques do projeto desenvolvido pelos autores, onde consta a visão completa do aparato, um detalhe da superfície aquecida e um esboço da montagem do dispositivo gerador.

Figura 7 - (a) estrutura completa; (b) detalhe do absorvedor Solar (c) Estrutura do dispositivo termelétrico.

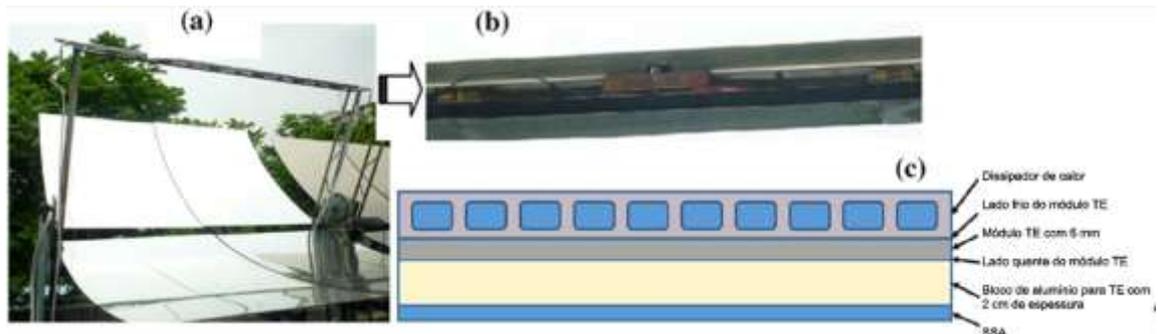


Fonte: adaptada de (PEREIRA *et al.*, 2015)

(MIAO *et al.*, 2015) O artigo fala da construção de um protótipo de cogeração Solar-termelétrica, composto de um absorvedor Solar seletivo, módulos termelétricos, tubo de água não pressurizada e um espelho parabólico alinhado em Leste-Oeste de 2 m x 2 m com 90% de refletividade. Os seis módulos termelétricos feitos de Bi_2Te_3 foram arranjados em série. A temperatura no lado quente dos módulos atinge valores superiores a 152 °C. A eficiência da conversão da energia Solar em energia elétrica é de 1,14%. A eficiência da extração de calor é de 56,1%. A eficiência total do sistema na melhor condição ambiental é de 49,5%. O sistema produziu uma potência elétrica de 18 W, ao mesmo tempo que produz um fluxo de 2 litros por minuto de água a 37 °C, destinada a um reservatório isolado. O sistema foi testado por 4 dias durante o mês de setembro de 2012 em Guangzhou, China. As temperaturas no TE foram de aproximadamente 35 °C a 155 °C. Para temperaturas variando de 30 a 50 °C no lado frio, a potência do sistema variou entre 13,653 e 16.360 W quando a

temperatura do lado quente estava a 150 °C. Para a mesma variação de temperatura do lado frio, com o lado quente a 150 °C, a potência variou de 3,578 a 4,881 W por módulo. A Figura 8 possui uma fotografia da estrutura estudada, um destaque da acomodação dos módulos termelétricos e um desenho descritivo dos elementos contidos no protótipo.

Figura 8- (a) Gerador Termelétrico com Concentrador Solar; (b) parte primária do gerador, com 6 módulos em série; (c) desenho esquemático da secção transversal do componente primário.



Fonte: adaptado de (MIAO *et al.*, 2015)

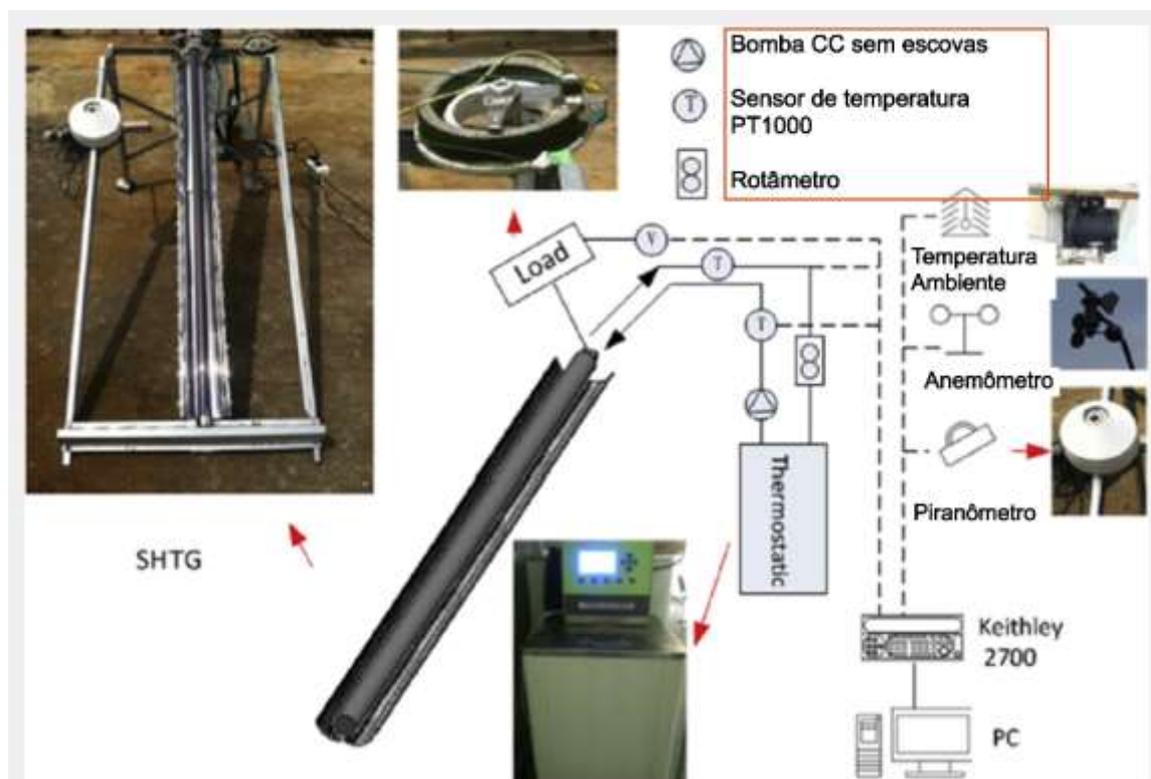
(BEERI *et al.*, 2015) Os autores, inicialmente, fazem uma revisão sobre outros trabalhos simulados. Em seguida fez-se uma análise experimental / simulada do desempenho do dispositivo sob condição de concentração Solar (aproximadamente 300 vezes) e constata que o desempenho do dispositivo termelétrico não é tão notório em comparação com o desempenho do dispositivo fotovoltaico. Porém, logo em seguida os autores apontam o real benefício da associação do dispositivo fotovoltaico a um dispositivo termelétrico - o resfriamento.

(UR REHMAN; SIDDIQUI, 2016) Os autores iniciam o texto relatando o uso da energia Solar concentrada para ativação de turbinas para produção de energia elétrica. Como alternativa, sugere uma associação de vários dispositivos termelétricos acoplados eletricamente em série e termicamente em paralelo. Porém, pela baixa eficiência de conversão, são utilizados apenas em pequena escala. Sendo assim, sugere que se utilize a luz do Sol concentrada diretamente nos módulos, diminuindo as perdas.

(DAI *et al.*, 2016) O artigo refere-se ao uso de um dispositivo termelétrico de Bismuto-Telúrio, usando um coletor de tubo evacuado sob concentração Solar de um mini concentrador parabólico. Os autores apontam que em seu trabalho, caso se utilize de um

dispositivo termelétrico à base de bismuto-telúrio, cuja figura de mérito seja igual a 1, sob temperaturas de 100 °C a 200 °C e taxa de concentração de 0,92, as eficiências elétrica e térmica do sistema chegam a 3,3% e 48,6%, quando a radiação Solar atinge 800Wm^{-2} e a temperatura da água à 20 °C. A água aquecida chega a uma temperatura de 45 °C, sendo assim aplicável a uso doméstico. Os autores concluíram, dentre outras, que o rendimento do mini concentrador é acima de 80% sem sistema de seguidor solar. A constante de geração termelétrica pode ser determinada por uma irradiância do Sol e é quase independente à temperatura da água, ou seja, o sistema pode converter o excesso de calor Solar em eletricidade. A Figura 9 possui uma fotografia da estrutura estudada, seguida de um diagrama com a relação entre os elementos que compõem a estrutura.

Figura 9 - Foto e esquema

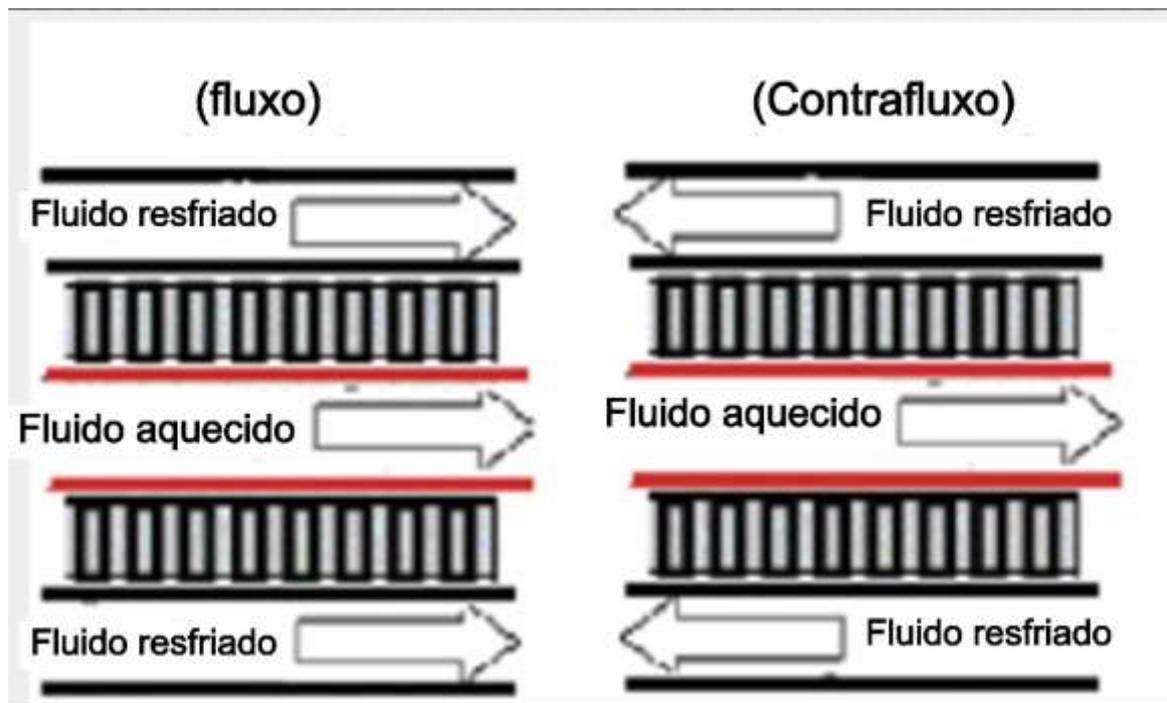


Fonte: adaptado de (DAI *et al.*, 2016)

(HE *et al.*, 2016) Este artigo apresenta uma análise de um gerador termelétrico que opera sob baixo nível térmico, utilizando quatro formas de resfriamento: ar, água, gelo e nitrogênio líquido. O objetivo é comparar o desempenho do gerador em termos de potência elétrica gerada e eficiência termelétrica. Os resultados mostram que a escolha de uma área

otimizada para a taxa de transporte de matéria do fluido é importante para a extração de calor, mas que essa escolha não depende da temperatura interna do fluido. Os resultados também indicam que os métodos que utilizam água como fluido de resfriamento são os mais eficazes, seguidos pelo gelo, pelo nitrogênio líquido e pelo ar. No caso do resfriamento com água, o sistema demonstra que a quantidade de massa transportada pelo fluido influencia a extração de calor até um certo limite, a partir do qual a potência e a eficiência se estabilizam. Na Figura 10 destaca-se a distribuição de calor de forma bidirecional entre os módulos termelétricos devido a passagem do fluido aquecido entre os módulos, com fluido refrigerante circulando pelas extremidades.

Figura 10 – Esquema da estrutura.



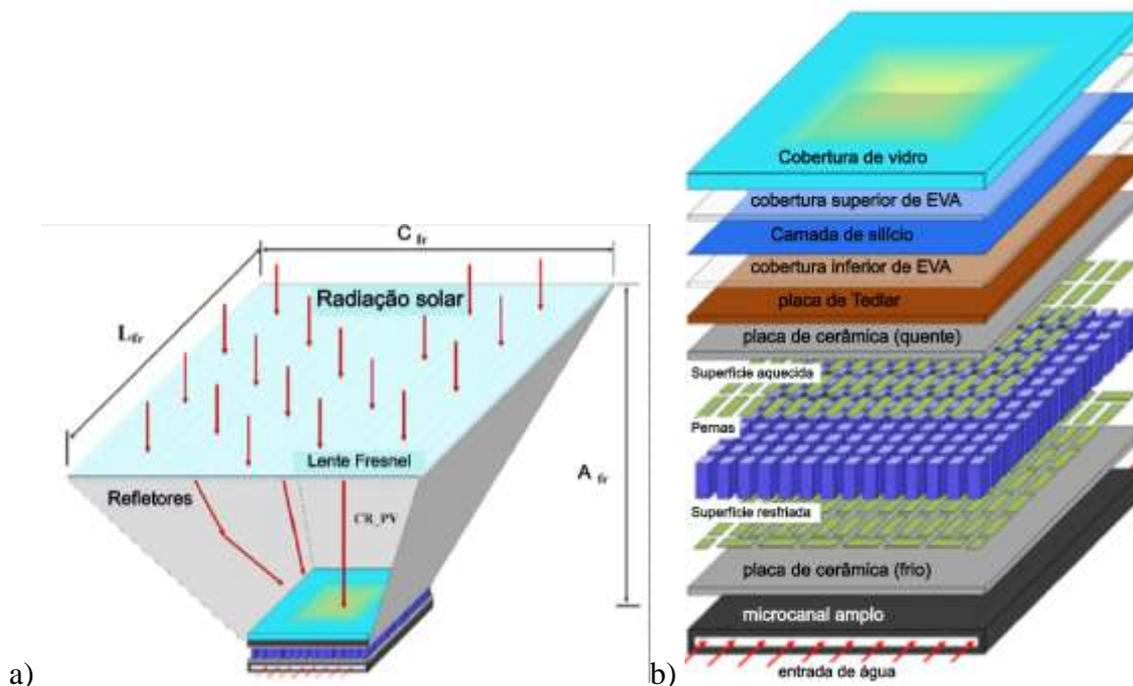
Fonte: adaptado de (HE *et al.*, 2016)

(ZHOU *et al.*, 2017) O trabalho utiliza-se de dispositivo termelétrico para recuperação de energia desperdiçada tanto na exaustão quanto no consumo de água em um veículo. O sistema aponta para uma redução de 39% no consumo de água, promovendo uma economia de combustível de 0,18 L/h quando o veículo se move a uma velocidade de 60 km/h. Além da recuperação do calor exalado pelo escapamento do veículo, uma lâmina d'água promove o resfriamento do lado frio do dispositivo termelétrico. Um dos resultados

relevantes é que, quanto maior for a velocidade do veículo, maior é a economia de combustível, onde a 20 km/h economiza 0,06 L/h e a 80 km/h economiza 0,24 L/h. Lembrando que a temperatura de saída do motor chega a 600 °C. O dispositivo termelétrico de Bi_2Te_3 é submetido a 281 °C em seu lado mais quente e a 98 °C em seu lado frio, chegando a uma diferença máxima de aproximadamente 180 °C. A potência máxima gerada neste trabalho é de 289,4 W.

(ABDO; AHMED; OOKAWARA, 2018) O artigo propõe um sistema híbrido composto por um concentrador Solar, uma célula fotovoltaica e uma célula termelétrica. Nesta proposta, a célula termelétrica é disposta diretamente sob a superfície inferior da célula fotovoltaica. A temperatura média é de aproximadamente 77 °C e a potência elétrica total gerada é de aproximadamente 3,2 kW/m², sob uma concentração Solar de 20 vezes. Porém, em sistemas convencionais, o máximo de concentração possível é de 10 vezes e a temperatura do sistema se aproxima do máximo tolerável, que é de 90 °C. Além disso, a potência gerada é de 1,2 kW/m². A Figura 11 traz uma visão explodida com todos os elementos usados na composição do dispositivo.

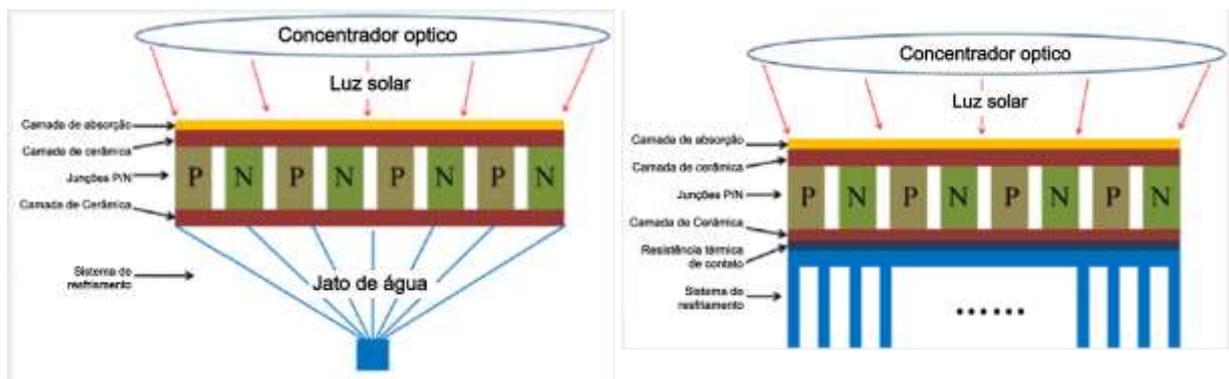
Figura 11 – a) Visão geral do concentrador e da célula; b) visão explodida da célula.



Fonte: adaptada de (ABDO; AHMED; OOKAWARA, 2018)

(GE, M. *et al.*, 2018) O trabalho propõe a utilização de *spray* de água para melhorar o resfriamento do Gerador Solar Termelétrico (GSTE). Sob uma concentração de 200 vezes, o *spray* demonstrou uma eficiência 31% maior do que usando água líquida. Os valores que promovem equilíbrio ao sistema e assim um melhor desempenho, é quando a taxa de concentração está em 165 vezes, um *spray* com fluxo de 0,35 L/min com figura de mérito $ZT = 1$. Neste caso, a eficiência chega ao seu máximo em 13,203%. A Figura 12 mostra um esboço da visão lateral da estrutura, de onde se pode destacar o uso do *spray* de água em comparação ao uso de dissipador sólido.

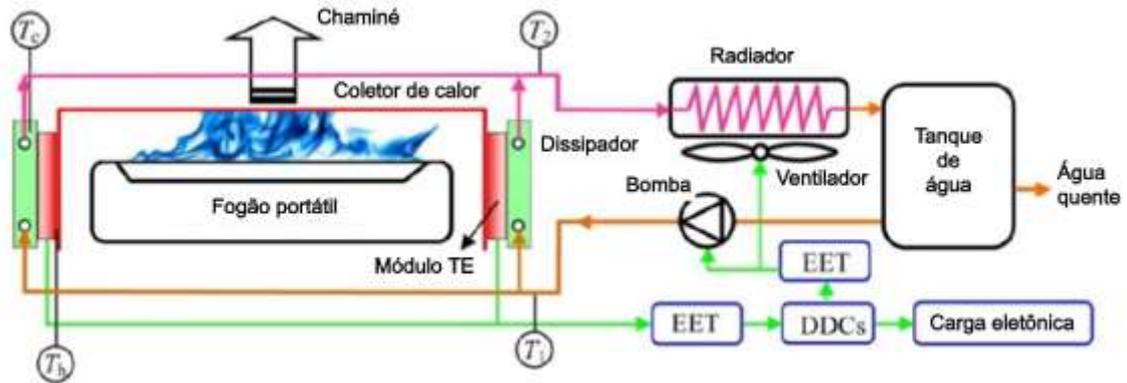
Figura 12 - Resfriamento com *spray* de água (Esquerda); Resfriamento com água líquida.



Fonte: Adaptado de (GE, M. *et al.*, 2018)

(LV *et al.*, 2018) Os autores propõem a construção de um gerador termelétrico movido a gás resfriado com água. Em sua revisão, apontam para diversos modelos de geradores termelétricos semelhantes com resfriamento por ar. Destes modelos, destacou-se uma potência elétrica de 7,8 W. Alguns dos modelos propõem, inclusive, o fornecimento de água quente além da energia elétrica. Com esta configuração, obteve-se na saída uma potência elétrica total de 12.9 W, onde 6,9 W podem ser usados por uma carga externa a uma tensão constante de 5 V, a uma diferença de temperatura de 119 °C. Porém, considerando a combinação de potências térmica e elétrica, pode-se contar com 530 W de ar quente que sai do radiador. Concluem que a eficiência termelétrica é de 2,78%. O sistema radiador torna o gerador compacto, mas compromete sua eficácia. Mesmo testando vários fluxos de calor, o resultado indicou uma condutância térmica de 70%. O vazamento térmico ainda é relevante. A Figura 13 ilustra a distribuição dos elementos em um diagrama de blocos, com destaque na disposição dos módulos em relação à chama.

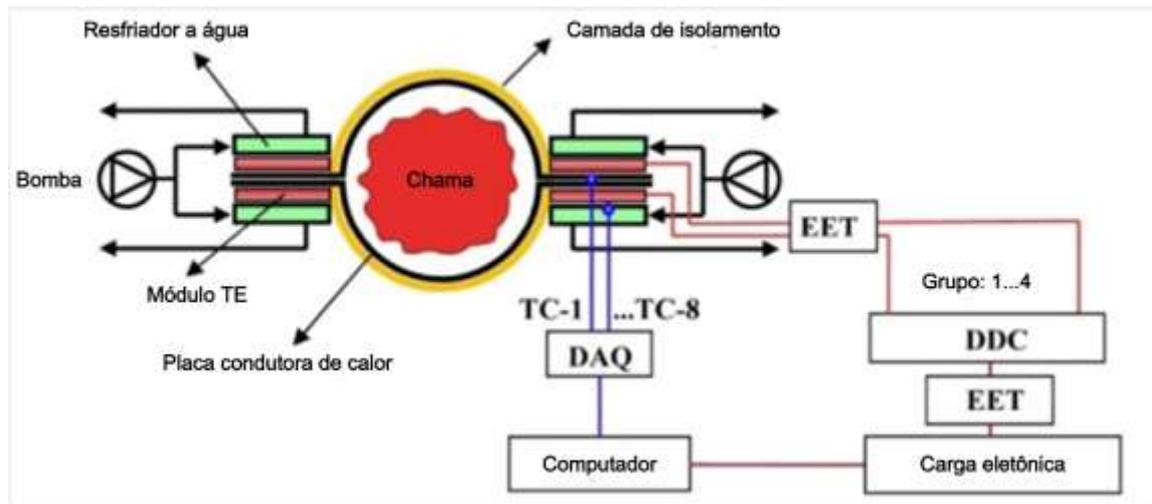
Figura 13 - Ilustração da estrutura com diagrama de blocos.



Fonte: adaptado de (LV *et al.*, 2018)

(LI, G. *et al.*, 2019) O presente artigo apresenta em sua introdução uma tabela comparativa entre geradores termelétricos movidos a combustão. Na tabela, alguns geradores apresentam resfriamento a ar e outros a água. Dentre eles, os resfriados a água apresentam maior potência de saída. Para o caso deste artigo, o desempenho do sistema foi de 51,2 W com tensão constante de 12 V. Além disso, o sistema foi construído com 20 módulos termelétricos Bi^2Te^3 e alcançou uma diferença de temperatura de 136 °C. O modelo apresentado foi assim escolhido por alguns fatores discriminados pelo autor. Em comparação a outros modelos, o modelo em questão trouxe bom desempenho quanto a diferença de temperatura e eficiência (3,66 %). A Figura 14 mostra um diagrama com a relação entre os elementos responsáveis pelo funcionamento da estrutura, com destaque na distribuição dos módulos em relação à fonte de calor.

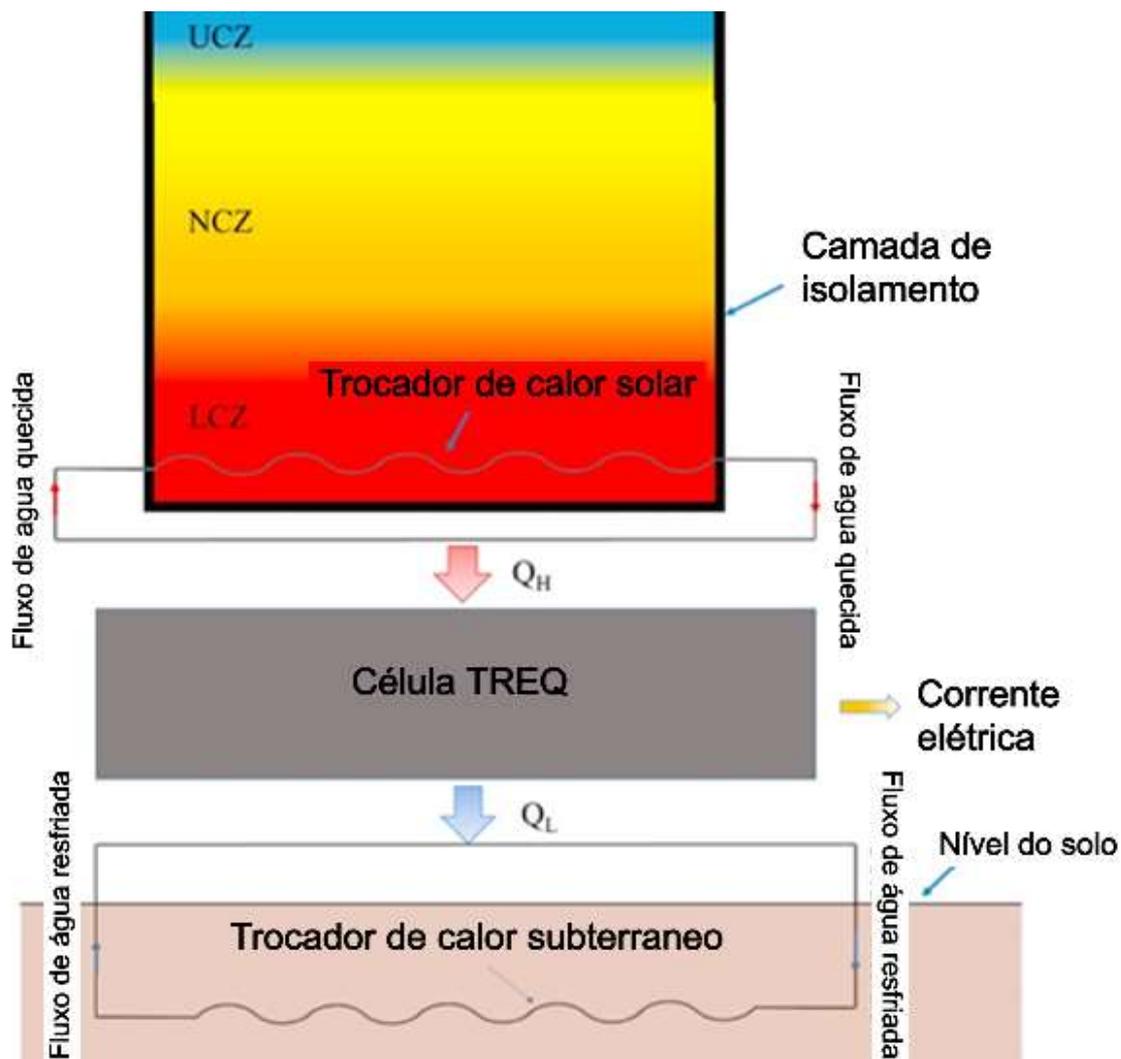
Figura 14 - Esquema de funcionamento da estrutura.



Fonte: adaptado de (LI, G. *et al.*, 2019)

(AL-NIMR; DAWAHDEH; ALI, H. A., 2022) Os autores utilizam aquecimento Solar e resfriamento por trocador de calor subterrâneo para geração de energia com tecnologia Termo Regenerativa Eletroquímica, cujo desempenho elétrico depende diretamente da diferença de temperatura. O sistema de resfriamento geotérmico tem sua eficiência reduzida quando a temperatura de entrada aumenta de 10 °C para 30 °C. A Figura 15 mostra como são organizadas as fontes de calor em relação à célula.

Figura 15 – Sistema de geração de energia por célula eletroquímica com aquecimento Solar e resfriamento geotérmico.

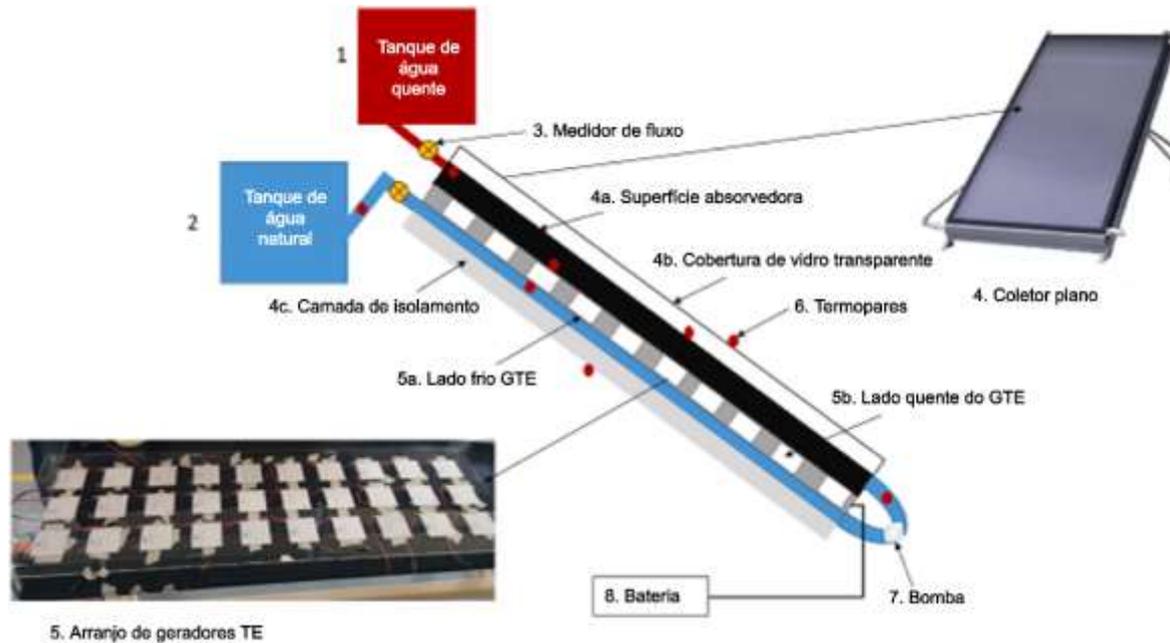


Fonte: adaptado de (AL-NIMR; DAWAHDEH; ALI, H. A., 2022)

(ALGARNI; IRSHAD, 2023) Neste artigo, os autores desenvolveram um coletor Solar plano combinado com geradores termoelétricos. Os dispositivos termoelétricos aproveitam a energia térmica dissipada pela parte posterior do coletor plano, melhorando a eficiência térmica do coletor. O sistema foi analisado experimentalmente na Arábia Saudita, em clima semiárido com temperaturas que variam de 8,8 °C a 34,7 °C ao longo do ano. O coletor possui área de aproximadamente 2,6 m² e aquece água a uma temperatura de no máximo 59,2 °C. Nas melhores condições, o dispositivo termoelétrico produziu potência

elétrica de 2,3 W. A Figura 16 mostra uma fotografia do arranjo de módulos termelétricos e um esboço da visão lateral da montagem, em relação à circulação do fluido.

Figura 16 – Estrutura híbrida de coletor Solar plano com dispositivos termoeletricos.



Fonte: adaptado de (ALGARNI; IRSHAD, 2023)

2.2.2 AQUECIMENTO POR ENERGIA SOLAR

(LIU, Z. H. *et al.*, 2013) O trabalho trata de um tubo evacuado como coletor Solar, integrado com um concentrador parabólico anidólico simplificado. Há um termosifão aberto usando água com nanofluido de óxido de cobre como termo fluido. O sistema foi exposto ao Sol e seu comportamento foi analisado. O autor relata que o sistema com nano fluido possui melhor desempenho do que apenas com água. A temperatura máxima excede 170 °C com volume de ar na taxa de 7,6 m³/h no inverno, mesmo com apenas dois painéis coletores. A foto expressa a montagem dos painéis usados no experimento. No detalhe, o formato do coletor utilizado. Os testes apontaram para um melhor desempenho no painel que contém nano fluidos e tubo concêntrico. O desempenho foi de até 12,4% melhor que o pior caso. A Figura 17 contém uma foto dos quatro modelos de coletor Solar com os

respectivos tanques de água e nanofluido, além do esboço da curvatura da calha em relação ao tubo evacuado.

Figura 17- (a) Foto do aparato experimental; (b) Perfil padrão do concentrador; (c) Perfil simplificado do concentrador.

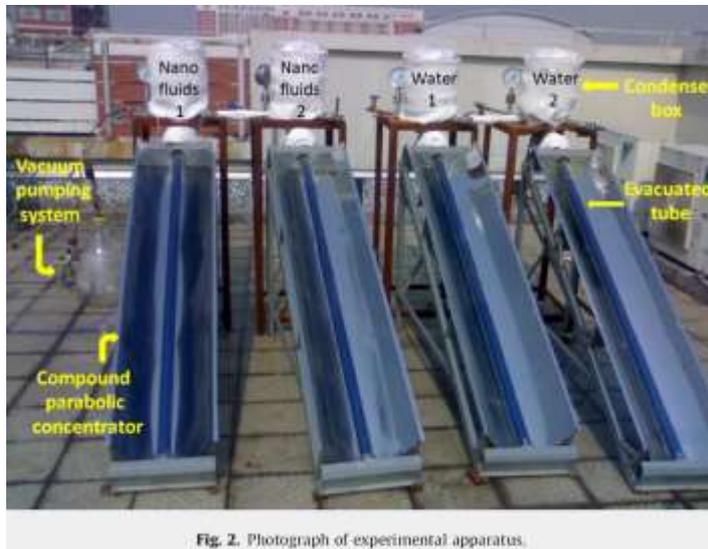
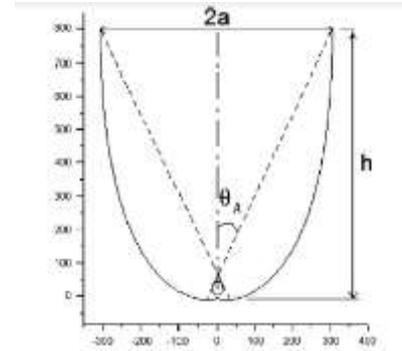
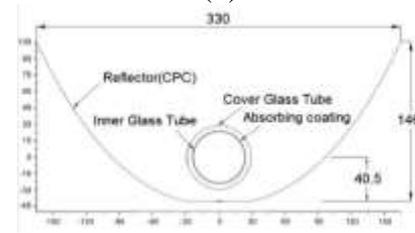


Fig. 2. Photograph of experimental apparatus.

(a)



(b)



(c)

Fonte: (LIU, Z. H. et al., 2013)

(WANG, P. Y.; LI, S. F.; LIU, Z. H., 2015) O artigo trata de um sistema de aquecimento de ar industrial. Um sistema composto por um tubo cilíndrico de vidro evacuado e um cilindro concêntrico de cobre com uma fina camada de um excelente condutor térmico. O sistema promove variações de temperatura de 150 °C a 220 °C, com bom desempenho mesmo durante o inverno. O formato do concentrador é difuso, não formador de imagem do tipo anidólico.

(HOSSAIN *et al.*, 2016) O modelo proposto pelos autores se apresenta como mais barato e mais eficiente que os modelos por eles analisados. O painel possui um arranjo de duas serpentinas paralelas com 68 peças de cobre, cotovelos inclinados a 90° para o fluxo de água em direção ao interior do coletor. Um painel fotovoltaico alimenta o circuito eletrônico de bombeamento, tornando o sistema autossuficiente. O modelo possui uma eficiência média nos períodos de junho a julho de 70%. O retorno do investimento é de aproximadamente 5 anos. A temperatura máxima atingida pelo sistema foi de 80,21°C, tendo em raras circunstâncias um pico de 98°C. O fluxo do sistema é de aproximadamente 300 mL por

minuto. O coeficiente de perda de calor é de aproximadamente $8,37 \text{ W/m}^2\text{K}$. Os autores concluíram que seu sistema é viável para aplicações reais.

(ARUNKUMAR *et al.*, 2016) O artigo trata de um aquecedor Solar tubular sob concentração parabólica. A aplicação é voltada para dessalinização de água. O sistema recebeu uma cobertura piramidal capaz de melhorar o escoamento de água condensada. A temperatura máxima da água foi de $95 \text{ }^\circ\text{C}$, quando a temperatura externa do sistema estava em $57 \text{ }^\circ\text{C}$. Para melhorar o desempenho do sistema e obter mais água dessalinizada, é feito um resfriamento posterior, favorecendo a condensação do vapor d'água obtido. A Figura 18 é uma fotografia do sistema completo, contemplando o reservatório superior e a cobertura piramidal.

Figura 18 - Foto do sistema com pirâmide.



Fonte: (ARUNKUMAR *et al.*, 2016)

(ZHANG, H. *et al.*, 2017) O artigo trata da utilização de um Concentrador Parabólico Composto em um sistema de geração fotovoltaico. O formato do concentrador foi obtido através de simulação com o *software* LIGHTTOOLS. O modelo sugerido propõe uma boa uniformidade de luz na superfície do painel fotovoltaico. Com isso, é possível reduzir a área ocupada pelo sistema. O sistema ainda conta com seguidor Solar para manter a radiação direta dentro das aletas. O sistema é capaz de reduzir a não-uniformidade da luz em 50%. A intensidade de luz varia entre 2707 W/m^2 e $3519,8 \text{ W/m}^2$. O artigo não fala sobre

desempenho do sistema de geração nem de temperatura do painel. Na Figura 19 é possível contemplar as estruturas de concentração Solar com foco no sistema fotovoltaico.

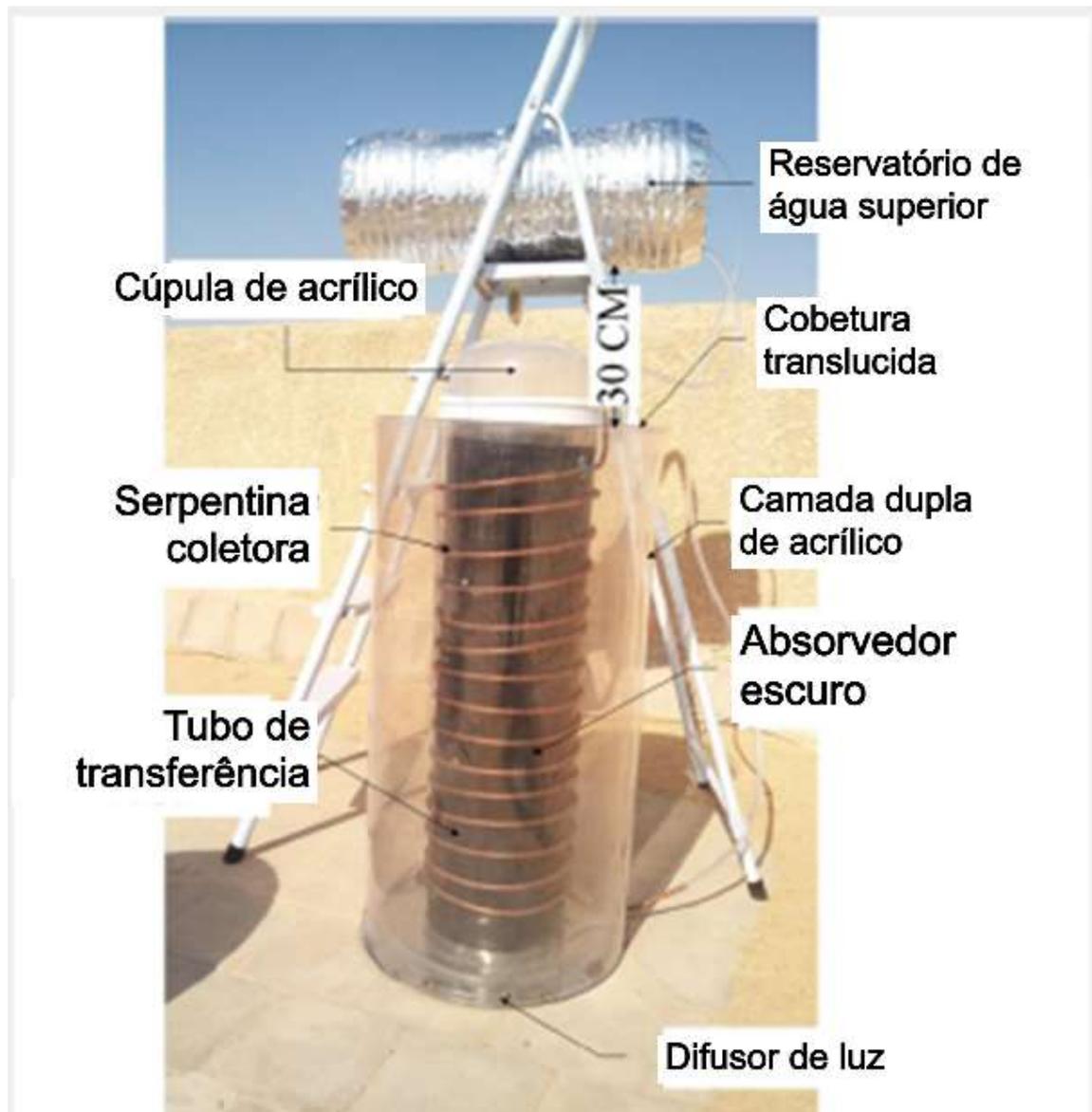
Figura 19 - Foto da configuração experimental.



Fonte: (ZHANG, H. et al., 2017)

(MARMOUSH *et al.*, 2018) O trabalho mescla tecnologias de aquecimento de água e iluminação de ambiente utilizando luz Solar. A luminosidade chega a 6.5 W/m^2 . A temperatura da água chega a $62 \text{ }^\circ\text{C}$. A eficiência chega a 21,17%. A proposta otimiza o espaço utilizado para coleta de energia Solar, promovendo dois benefícios da utilização da energia Solar. O modelo de construção do projeto otimiza a área da superfície. Na foto da Figura 20 é possível observar a tubulação em espiral contornando o absorvedor preto dentro do tubo difusor.

Figura 20 - Foto da estrutura com discriminação dos componentes.

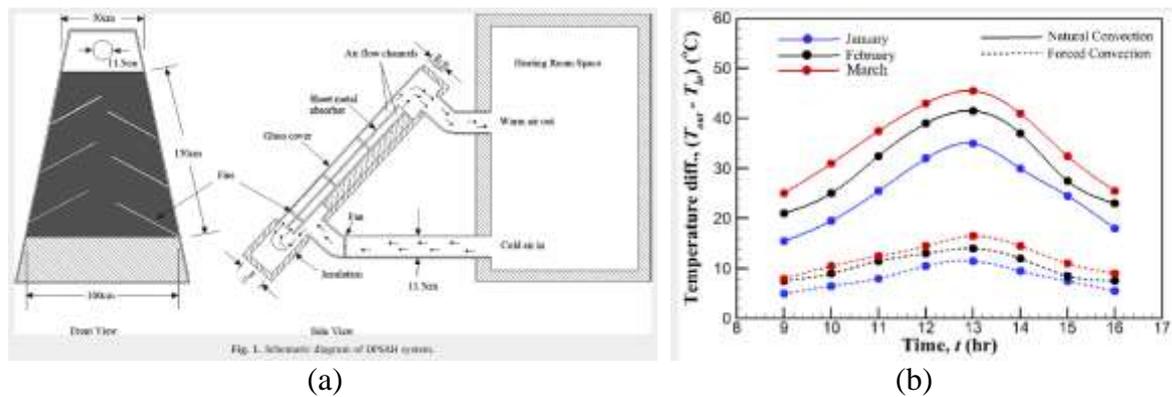


Fonte: Adaptado de (MARMOUSH et al., 2018)

(SALIH *et al.*, 2019) O trabalho apresenta uma comparação entre dois modelos de aquecedor de ar Solar, um com circulação e outro com circulação forçada. Submetidos a condições semelhantes, os dois modelos, cujo formato trapezoidal incrementa a velocidade do ar na saída (ar quente), diferem apenas na inserção de um ventilador na entrada inferior (ar frio). Durante o inverno de Mosul, Iraque, os dois aquecedores foram expostos ao Sol e tiveram seus dados coletados a cada 30 minutos através de sensores e suas informações armazenadas em planilha. A radiação oscilou entre 0 W/m² e 689 W/m² (em janeiro, o máximo foi apenas 564 W/m²). Conforme apontam os resultados, para uma aplicação que

requiera uma maior diferença de temperatura entre os dutos de entrada e saída, o módulo de convecção natural é mais indicado. O modelo com convecção forçada possui temperatura máxima sempre inferior a 35 °C. Já no caso de convecção natural, conforme os gráficos, pode variar de 45 °C a 80 °C. Isso com temperatura ambiente variando de 14 °C a 21 °C. O gráfico da Figura 21 representa a variação de temperatura com e sem o aparato aquecedor, representando um maior conforto térmico.

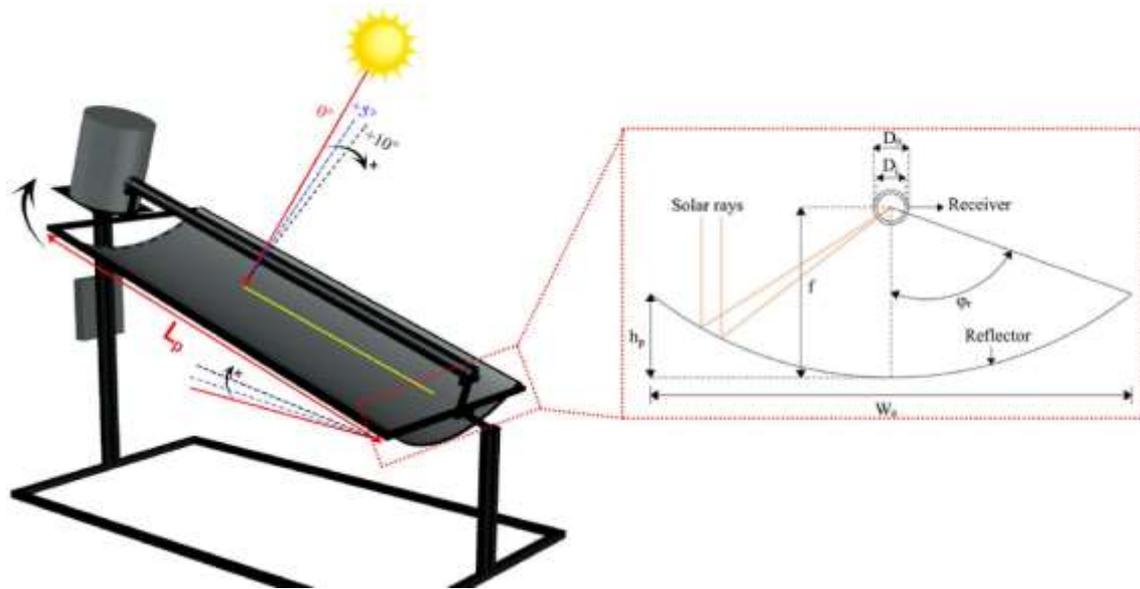
Figura 21 - (a) Projeto da estrutura; (b) Desempenho sob convecção natural e convecção forçada.



Fonte: (SALIH et al., 2019)

(GUIMARÃES BARBOSA *et al.*, 2023) O artigo trata da análise de um concentrador Solar parabólico estacionário com armazenamento térmico. Foi analisado o desempenho do sistema sob condições de variação de inclinação de zero a dez graus e também com diferentes fluidos (óleo e água). Foram feitas análises exegéticas, exergoeconômica e ambiental. A combinação com melhor eficiência exegética foi com uso de óleo e sob inclinação de 10 °. O tempo de recuperação de carbono foi de 0,923 para o sistema com água. O desenho da Figura 22 contempla a estrutura de calha parabólica com o ângulo de inclinação em relação ao Sol.

Figura 22 – Estação estática de concentrador Solar do tipo calha parabólica.

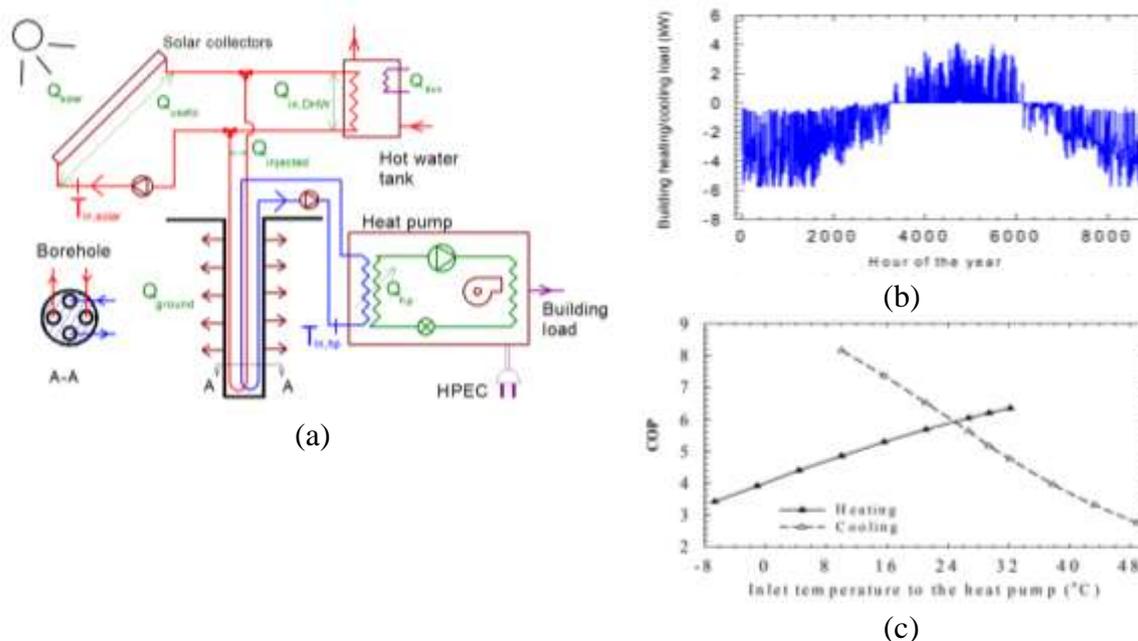


Fonte: (GUIMARÃES BARBOSA et al., 2023)

2.2.3 RESFRIAMENTO PASSIVO

(ESLAMI-NEJAD *et al.*, 2009) Neste artigo, é analisada a injeção de energia Solar em um sistema geotérmico de troca de calor. O sistema é composto por circuitos distintos de aquecimento e resfriamento, mantendo a temperatura no interior do prédio em condição agradável. A proposta, então, é de múltiplos buracos profundos, promovendo um melhor aproveitamento do sistema de injeção de calor proveniente do Sol. O sistema promove aquecimento para o prédio durante o período de outubro a abril e promove resfriamento no período de maio a setembro. O diagrama da estrutura está na Figura 23 ilustra a circulação do fluido pelo sistema.

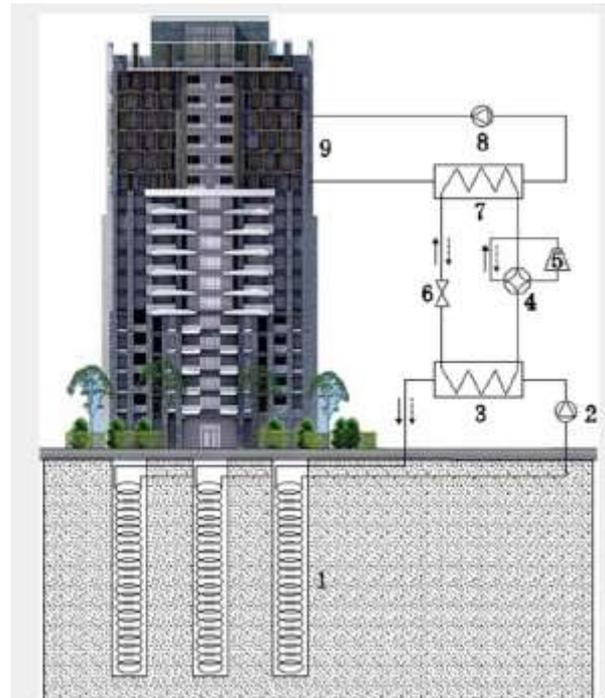
Figura 23 - (a) Diagrama da estrutura; (b) Carga térmica da edificação; (c) Performance da bomba de calor usada no experimento.



Fonte: (ESLAMI-NEJAD et al., 2009)

(WANG, Deqi *et al.*, 2015) Os autores sugerem um arranjo em forma de espiras para um melhor desempenho. Foi feita uma simulação tridimensional utilizando ANSYS. Foram desenvolvidas as equações e condições de fronteira para uma análise numérica profunda. Porém, para realizar a simulação, foi considerado apenas a porosidade da superfície, com transferência de calor apenas entre o Solo e a interface do fluido. Embora o processo de transferência de calor deste sistema seja instável e não linear, foi possível utilizar o método de elementos finitos com uma precisão relativa para o ambiente de simulação. Após fazer comparações entre os modelos numéricos e analíticos, concluiu-se que ambos funcionam em acordo, quando passadas algumas horas de funcionamento. O resultado mostra que o sistema consegue extrair calor do fluido e o processo entra em estabilidade mais rapidamente. Porém, quando o fluido flui com uma velocidade maior, ocorre um desvio. A Figura 24 dá uma ideia de proporção entre o tamanho da estaca geotérmica e o prédio.

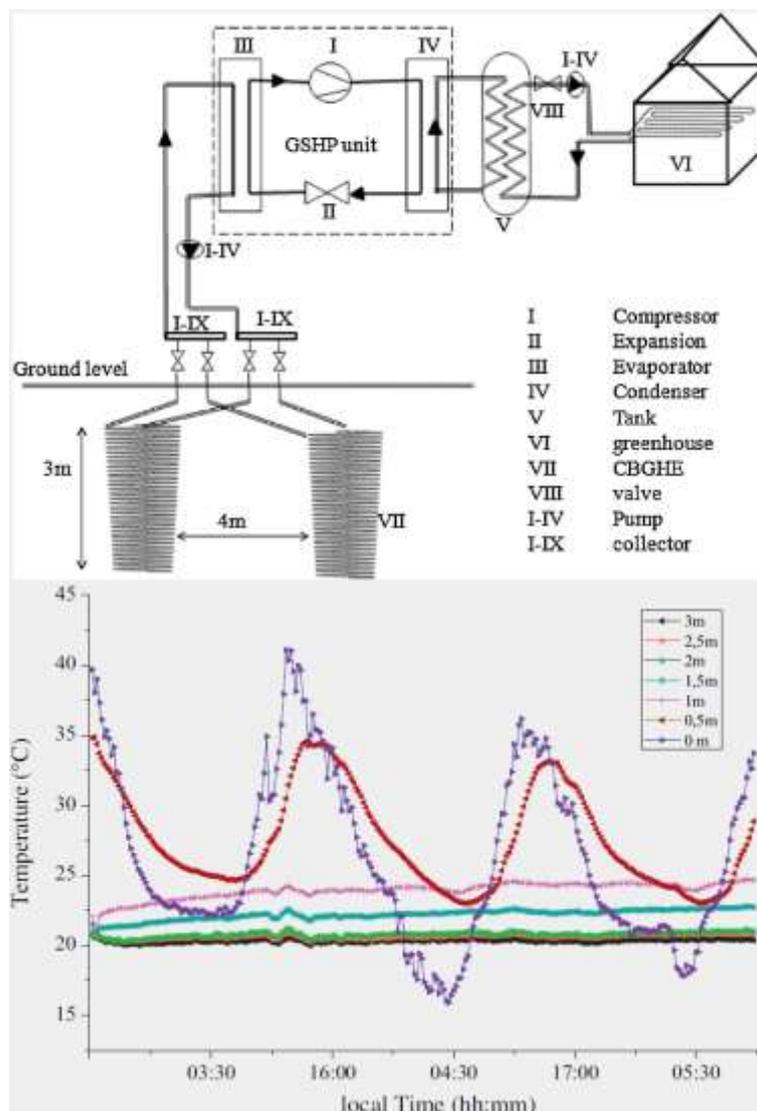
Figura 24 - Diagrama do sistema com exaustor geotérmico em espiral.



Fonte: (WANG, Deqi et al., 2015)

(BOUGHANMI *et al.*, 2015) O artigo trata de um sistema de climatização residencial que utiliza um extrator de calor acoplado a uma bomba geotérmica implantada a 3 metros de profundidade. Durante o período de experimento, a quantidade máxima de calor transferido para o Solo foi de aproximadamente 8 kW. A maior diferença de temperatura entre o interior da edificação e o extrator de calor foi de 30 °C, com um fluxo de massa de 0,08 kg/s. A temperatura no interior da edificação reduziu cerca de 12 °C. Em uma análise anual. Enquanto em condições normais a temperatura oscila de 11 °C (janeiro) a 25 °C (julho), com o sistema implementado a uma profundidade maior de 3 metros a temperatura oscila de 15 °C a 22 °C, promovendo uma condição mais confortável. O gráfico da Figura 25 mostra como é o comportamento da temperatura ao longo do dia em diferentes profundidades.

Figura 25 - Diagrama da estrutura; Comportamento da temperatura a profundidades diferentes (direita).



Fonte: (BOUGHANMI et al., 2015)

(TEMPLETON; HASSANI; GHOREISHI-MADISEH, 2016) O artigo propõe um ciclo fechado de transferência de calor, com energia Solar acumulada em um sistema geotérmico. O sistema promove troca de calor com o Solo em ambos os sentidos. O autor relata que a principal conclusão obtida após participar de três conferências sobre energia geotérmica, é que é mais rentável cavar poços mais profundos do que tentar recarregar o sistema com energia Solar. O artigo traz ainda uma equação matemática que propõe uma troca de calor radial, determinada pela relação entre profundidade, temperatura, condutividade térmica, densidade, calor específico e velocidade da água. Através da modelagem matemática, foi possível fazer uma prospecção ao longo de 13 anos, utilizando

este modelo para prover conforto residencial. Foi feita uma comparação com o uso de coletores Solares capazes de injetar calor no sistema, durante os períodos mais frios. O texto conclui-se com um levantamento de economia financeira do uso deste sistema ao longo de 15 anos, podendo chegar a uma economia de quase 13 mil dólares.

(ACUÑA *et al.*, 2017) O artigo trata de um sistema de resfriamento Solar com exaustor geotérmico. O sistema consiste em um ciclo de compressão e expansão, cujo calor adquirido durante a compressão é extraído via circulação geotérmica. A eletricidade para funcionamento das bombas e ventiladores é obtida através de painel fotovoltaico. Uma termografia do sistema geotérmico aponta uma temperatura de aproximadamente 10 °C. Em sua conclusão, o trabalho descreve um sistema de refrigeração com capacidade de 12,3 kW, assistido por um sistema fotovoltaico de 1kW, acoplado a um exaustor geotérmico. Os resultados demonstram que quando aumenta a profundidade do sistema geotérmico, há uma melhoria na eficiência de tal maneira que um sistema com 10 metros de profundidade possui eficiência 22% maior que um sistema de 1 metro de profundidade. Porém, através de análise computacional, o autor conclui que para profundidades abaixo de 10 metros, a temperatura máxima não fica menor do que 24 °C. O programa usado para as simulações foi o TRNSYS. A Figura 26 possui fotos do sistema e análise termográfica do dissipador subterrâneo com temperatura bem mais elevada que o Solo.

Figura 26 - Fotos de todo o sistema.

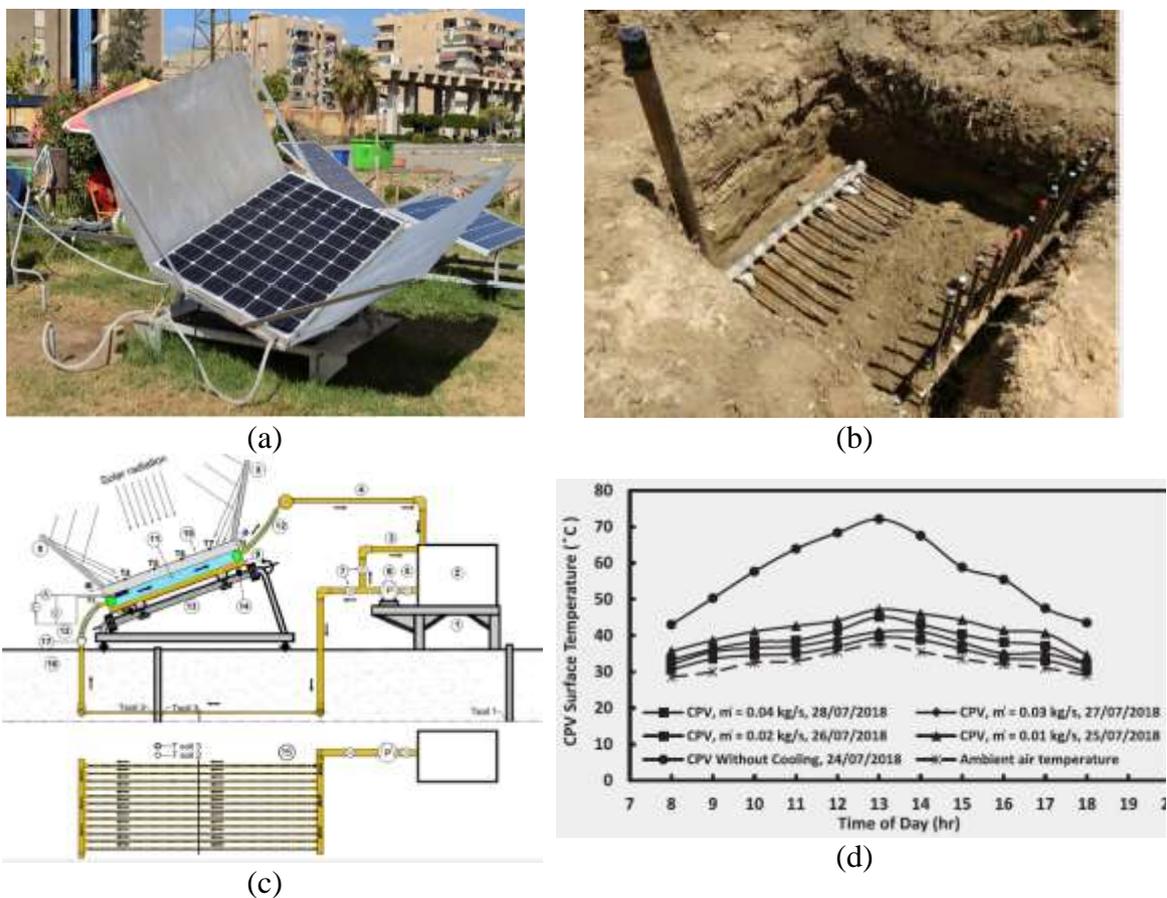


Fonte: (ACUÑA *et al.*, 2017)

(ELMINSHAWY *et al.*, 2019) O artigo trata de um sistema fotovoltaico sob concentração Solar, resfriado por um sistema geotérmico de circulação de água. Uma

estrutura de teste construída no Egito experimenta diferentes fluxos de água que variam de 0,01 kg/s a 0,04 kg/s. O sistema de resfriamento conseguiu reduzir a temperatura no painel de 72,5 °C para 39,3 °C com fluxo máximo. Uma análise econômica aponta uma melhoria de 12,20 % no preço da energia produzida, uma vez que com uma mesma área coberta por painéis fotovoltaicos, é possível obter uma maior quantidade de energia elétrica. No gráfico fica nítida a melhoria térmica do sistema, onde sem a presença do sistema de resfriamento, o painel atravessa uma zona crítica de 70 °C, enquanto com o resfriamento não ultrapassa os confortáveis 50 °C, mesmo com um fluxo de apenas 0,01 kg/s. A potência elétrica produzida também se altera de forma que sem um sistema de resfriamento, mas sob concentração Solar, o painel atinge valores na casa dos 175 W, enquanto com o resfriamento ultrapassa os 220 W. No gráfico da Figura 27 é possível observar o comportamento da temperatura em diferentes condições de funcionamento.

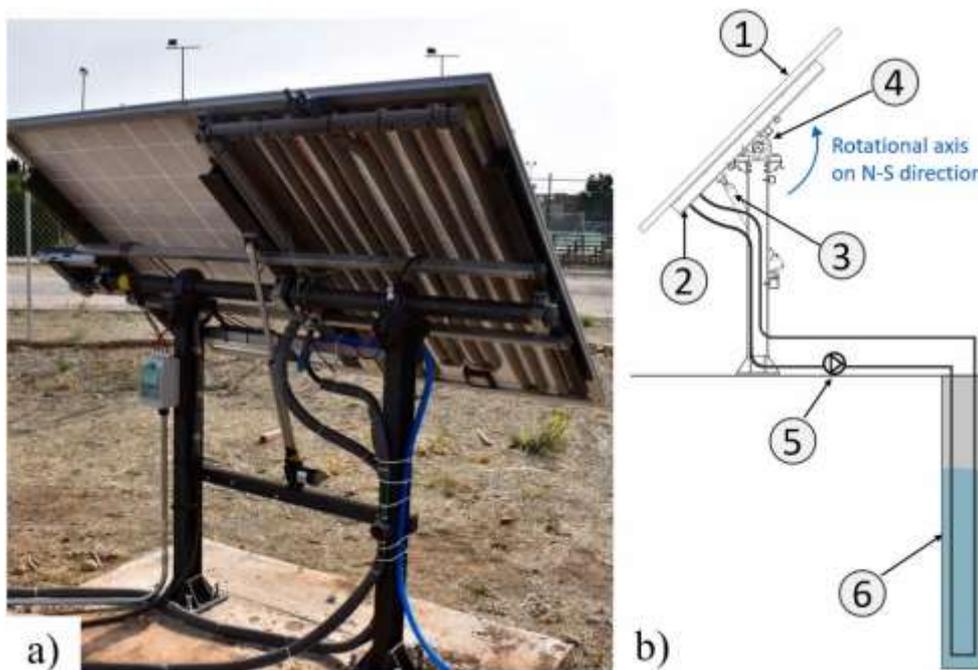
Figura 27 - (a) Configuração experimental; (b) Tubulação subterrânea; (c) Diagrama; (d) Gráfico da temperatura.



Fonte: (ELMINSHAWY et al., 2019)

(LOPEZ-PASCUAL *et al.*, 2023) O artigo trata de um sistema fotovoltaico com resfriamento geotérmico. O calor é removido do módulo através de tubulação instalada na parte de trás. O sistema hidráulico é composto por tubulação de cobre com fluido refrigerante composto por uma mistura de água e etilenoglicol. O sistema de bombeamento consome 55 W de potência elétrica para circular o fluido a 35 L/min. O resfriamento ocorre através de um poço de 15 metros de profundidade, com temperatura de aproximadamente 16 °C. Durante uma análise experimental, as temperaturas dos painéis fotovoltaicos chegaram a 44,8 °C sem resfriamento e 35,2 °C com resfriamento. Uma análise matemática prevê um incremento de 10,7 % na eficiência do sistema em um ano. Na foto da Figura 28 é possível observar a montagem da estrutura com duas situações de análise, sendo uma com o sistema de resfriamento ilustrado pelo diagrama e outra sem o sistema de resfriamento.

Figura 28 – Sistema de resfriamento geotérmico para painel fotovoltaico.



Fonte: (LOPEZ-PASCUAL *et al.*, 2023)

2.2.4 Principais trabalhos

Dentre os trabalhos revisados e mencionados até aqui, foram utilizadas algumas informações relevantes a esta pesquisa a respeito do desempenho dos sistemas em relação a temperatura e capacidade de produção de energia.

A respeito das temperaturas, foi resumido na Tabela 1 os valores de aquecimento e resfriamento, considerando as condições em que a pesquisa foi realizada, bem como o respectivo autor de cada trabalho.

Tabela 1 - Resumo das temperaturas encontradas na revisão bibliográfica em ordem cronológica.

Aquecedor Solar			
Autor	Condição	Temperatura (°C)	
(KRAEMER <i>et al.</i> , 2011)	Concentração Solar 10x. Calha parabólica. Geração termoelétrica	300	
(MILJKOVIC; WANG, E. N., 2011)	Calha parabólica. Concentração 100x	502,85	
(LIU, Z. H. <i>et al.</i> , 2013)	Calha parabólica. Tubo evacuado. Uso de nanofluidos	170	
(PEREIRA <i>et al.</i> , 2015)	Simulação de laboratório. Concentração Solar 100x. Geração termoelétrica	450	
(WANG, P. Y.; LI, S. F.; LIU, Z. H., 2015)	Concentrador parabólico difuso. Tubo evacuado	220	
(ARUNKUMAR <i>et al.</i> , 2016)	Calha parabólica	95	
(HOSSAIN <i>et al.</i> , 2016)	Coletor plano. Tubulação de cobre	98,09	
(SALIH <i>et al.</i> , 2019)	Aquecedor de ar trapezoidal	80	
Resfriamento Geotérmico			
Autor	Condição	Temperatura (°C)	
		Entrada	Saída
(BOUGHANMI <i>et al.</i> , 2015)	Estufa botânica. Condicionamento térmico.	24	19
(ACUÑA <i>et al.</i> , 2017)	Resfriamento de sistema fotovoltaico. Fluido comprimido	35	24
(STYLIANOU <i>et al.</i> , 2019)	Estaca em U. Extração de calor. Modelo computacional	44	20
(ELMINSHAWY <i>et al.</i> , 2019)	Sistema fotovoltaico sob concentrador Solar. Resfriamento geotérmico, fluxo de 0,04 kg/s	72,5	39,3
(ABED <i>et al.</i> , 2021)	Sonda subterrânea. Extração de calor	50	35
(ALBARGHOOTH; RAMIAR; RAMYAR, 2023)	Sistema geotérmico com tubo de 60 m com diâmetro	50	27

	de 0,2 m, velocidade de até 10 m/s		
--	------------------------------------	--	--

Em relação às potências elétricas produzidas, os trabalhos cujos resultados e condições corroboram com esta pesquisa estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Trabalhos com resultados relevantes para esta pesquisa.

Autor	Condição	Temperatura (°C)			Potência elétrica
		Mín	Máx	Dif.	W/unid
(LV <i>et al.</i> , 2018)	Aquecimento por combustão a gás. Resfriamento por água.	45,5	153,5	108	1,73
(LI, G. <i>et al.</i> , 2019)	20 módulos termelétricos Bi ² Te ³ . Aquecimento à combustão. Resfriamento à água	-	139	119	1,88
(ALGARNI; IRSHAD, 2023)	O coletor possui área de aproximadamente 2,6 m ²	-	59,2	28	1,82

2.3. CONCEITOS FUNDAMENTAIS - TERMELETRICIDADE

O fenômeno da termoeletricidade (ou termelétricidade) consiste em converter energia térmica em energia elétrica. Porém, em uma rápida busca por usinas termelétricas para geração de energia elétrica, logo se encontra resultados sobre grandes chaminés, turbinas a vapor e caldeiras, pois as usinas termelétricas encontradas na matriz energética funcionam a partir da utilização de vapor para produção de movimento rotativo em máquinas elétricas de corrente alternada. Da mesma forma, quando se fala em usina solar termelétrica, Termo solar ou Heliotérmica, logo vêm concentrador solar, tanques de sal fundido e turbinas a vapor, pois é assim que funcionam as grandes usinas térmicas movidas a luz solar.

Porém, para o contexto desta pesquisa, o termo **termelétricidade** será usado para se referir à conversão direta de calor em eletricidade, que ocorre através de um fenômeno natural entre diferentes materiais condutores sobre uma condição específica de diferença de temperatura.

2.3.1 História

Os fenômenos termelétricos naturais são percebidos pela comunidade científica desde o século XVIII e galgam compassadamente até os dias atuais (GOUPIL, 2016). O

primeiro relato que se tem registro sobre o fenômeno em questão ocorreu em 1762, com a percepção da mudança da polarização da turmalina e outros cristais em situações de variação da temperatura (efeito Piroelétrico) por *Johannes Aepinus*.

Tabela 3- Análise cronológica de pesquisas sobre termoeletricidade (adaptado de (GOUPIL, 2016)).

ANO	FENÔMENO	AUTOR
1762	Primeiro relato	Aepinus
1810	Observação de corrente termelétrica	Schweigger
1821	Primeiro relato do “termomagnetismo”	Seebeck
1823	Primeira explanação correta sobre “termoeletricidade”	Oersted
1834	Efeito Peltier com junção Bi-Sb	Peltier
1838	Congelamento de uma gota d’água por efeito Peltier	Lenz
1851	Efeito Thomson	Thomson (Lord Kelvin)
1885	Primeira proposta de gerador Termelétrico	Lord Rayleig
1910	Utilização de PbTe, Bi ₂ Te ₃ , Te como elementos termelétricos	Haken
1911	Refrigeração Termelétrica	Altenkirch
1945	Efeito de arrasto dos fônons	Gurevich
1947	Construção do primeiro gerador termelétrico	Telkes
1954	Usando termoeletricidade para produzir temperaturas abaixo de 0 °C	Goldsmind e Douglas
1982	Observação do decaimento da condutividade térmica no resfriamento	Ross e Anderson
1993	Nanotecnologia liderando avanços na eficiência dos materiais termelétricos	
2002	Pontos quânticos de Pb Te-Pb Se	Harman

Dentre os fenômenos citados na Tabela 3, destacam-se as pesquisas publicadas em 1821, 1834 e 1851, pois são os fenômenos mais estudados dentro deste contexto, bem como correspondem aos produtos comerciais dos quais nos utilizamos para realização de análise experimental. Em uma descrição bastante resumida, os efeitos em destaque se diferem pelos seguintes aspectos:

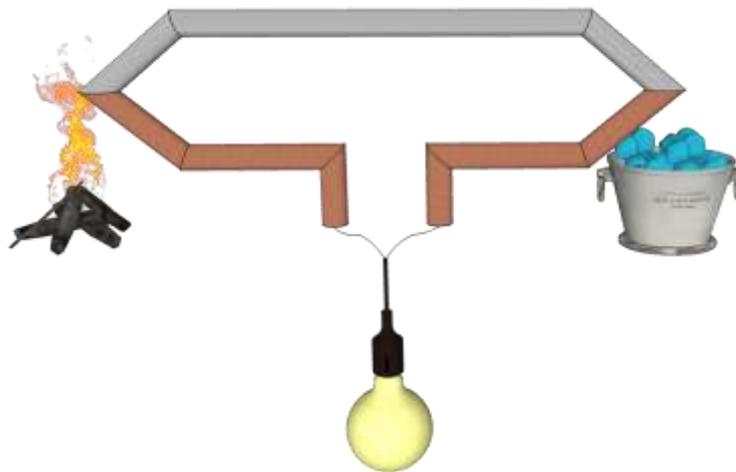
Efeito Seebeck (1821) - Consiste na polarização de elétrons que ocorre quando há uma junção de dois metais distintos, onde há diferença de temperatura entre o ponto de junção dos metais e suas extremidades.

Efeito Peltier (1834) - Consiste na reciprocidade ao efeito Seebeck, onde ao injetar corrente elétrica em uma combinação de metais, surge uma diferença de temperatura entre a junção dos metais e suas extremidades.

Efeito Thomson (1851) - Consiste na movimentação de elétrons de um metal, quando submetido a uma variação de temperatura entre suas extremidades.

Destes três fenômenos, esta pesquisa se aterá ao efeito Seebeck, pois a intenção da pesquisa é gerar energia elétrica a partir da produção de diferença de temperatura proveniente de fenômenos naturais. A Figura 29 mostra uma versão simplificada do conceito que norteia esta pesquisa, onde dois metais diferentes unidos eletricamente são expostos a uma grande diferença de temperatura. Essa diferença de temperatura promove movimentação de elétrons, fornecendo assim potência elétrica a uma carga.

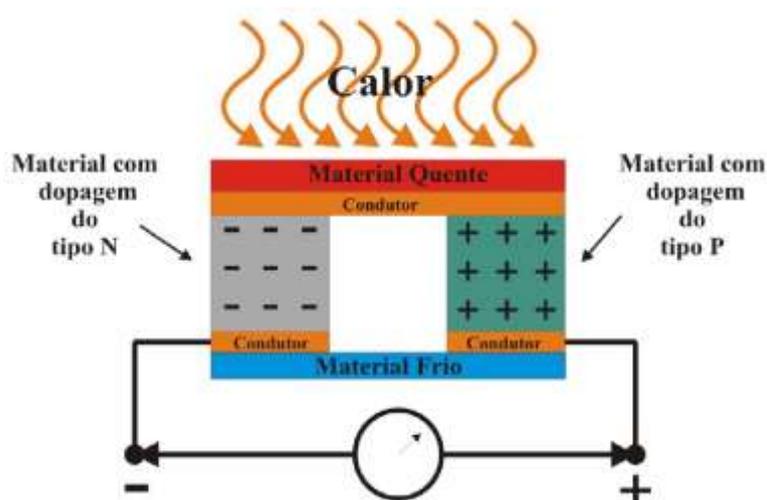
Figura 29 – Adaptação do esquema simplificado do efeito Seebeck para fornecimento de energia elétrica a uma carga elétrica - conceito básico



Fonte: (ALMEIDA, C H A *et al.*, 2022)

Com o avanço das pesquisas sobre o fenômeno da termoeletricidade, chegou-se a modelos compactos de multijunções bimetálicas, compostas por semicondutores dopados, arrançados em combinações série-paralelo, com extremidades em cerâmica para melhor desempenho térmico. O esboço da Figura 30 representa uma única célula composta por semicondutores dopados exposta a uma diferença de temperatura. Sob tais condições, a célula apresenta uma diferença de potencial em seus terminais.

Figura 30 – Esquema simplificado do efeito Seebeck em junção bimetalica de materiais semicondutores, conforme modelos atuais



Fonte: (DIAS; MACIEL, 2019)

Um dispositivo que se utiliza do fenômeno da Termoeletricidade para geração de energia elétrica direta, necessita da maior diferença de temperatura possível entre suas faces para produzir energia elétrica a valores capazes de alimentar cargas elétricas. Conforme análise experimental em laboratório (ALENCAR; SOUTO, C., 2018; ALMEIDA, C.H.A.; SOUTO, C. D. R.; VERONESE, 2015), o comportamento da tensão elétrica e da potência elétrica entregue a uma carga é proporcionalmente semelhante ao comportamento da diferença de temperatura entre as faces do dispositivo.

Conforme consta no capítulo de revisão da literatura em 2.2.1, bem como no histórico de pesquisas da Tabela 3, as pesquisas apontam para a utilização da combinação de Bismuto e Telúrio (Bi_2Te_3) para confecção de células termelétricas capazes de trabalhar com temperaturas elevadas, aumentando a eficiência da conversão direta da energia térmica em energia elétrica.

É importante frisar a possibilidade de nacionalização da produção deste material, quando as universidades brasileiras já realizam pesquisas voltadas à escolha de uma combinação viável de metais para produção de energia elétrica a partir de recuperação de calor residual (AMÉRICO *et al.*, 2019).

2.3.2 Descrição Analítica

O princípio da conversão de energia térmica em energia elétrica por reação direta em estado sólido se dá através da junção de dois condutores diferentes, conforme Figura 29. A relação entre as grandezas de temperatura e tensão elétrica dão origem à equação de Seebeck:

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2.1)$$

Onde

- α é o coeficiente de Seebeck (V/K);
- ΔV é a diferença de tensão elétrica entre os terminais do dispositivo (V)
- ΔT é a diferença de temperatura entre as faces do dispositivo termelétrico (K)

O Coeficiente de Seebeck é obtido a partir das características construtivas do dispositivo termelétrico,

$$\alpha = \sqrt{\frac{ZT \cdot k}{\sigma}} \quad (2.2)$$

Onde

- α é o coeficiente de Seebeck
- ZT é a figura de mérito
- σ é a condutividade elétrica
- k é a condutividade térmica

Baseado na equação (2.2), obtém-se a equação da figura de mérito.

$$ZT = \frac{\sigma \cdot \alpha^2}{k} \quad (2.3)$$

A Figura de Mérito (ZT) é um valor quantitativo usado para determinar a performance de um dispositivo, método ou sistema. Conforme notório às equações, a Figura de Mérito deste sistema termelétrico relaciona o desempenho do dispositivo em sua finalidade (através do coeficiente de Seebeck) com as suas características construtivas (condutividade térmica e elétrica).

Analisando do ponto de vista da utilização da energia elétrica, a Figura de Mérito do dispositivo também pode ser calculada a partir da resistividade elétrica (ρ), conforme a equação (2.4).

$$ZT = \frac{\alpha^2}{k\rho} \quad (2.4)$$

A eficiência de um gerador termelétrico depende basicamente da figura de mérito e da diferença de temperatura do sistema, conforme relaciona a equação (2.5).

$$\eta = \frac{(T_q - T_f)}{T_q} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_q}{T_f}} \quad (2.5)$$

Onde

- η é o rendimento do dispositivo
- T_q é a temperatura do lado quente
- T_f é a temperatura do lado frio
- ZT é a figura de mérito

Sendo assim, a figura de mérito é um fator determinante na eficiência de todo o sistema de conversão de energia térmica em energia elétrica. Esta grandeza é determinada principalmente pelo material utilizado na fabricação do dispositivo e varia conforme a faixa de temperatura de funcionamento. A maior figura de mérito é encontrada atualmente em dispositivos à base de Bi_2Te_3 (Telureto de Bismuto) a uma faixa de temperatura com máxima em 126 °C. Essa faixa de temperatura encontrada em dispositivos de baixo custo (que suportam até 300 °C) é compatível com diversos sistemas de aquecimento Solar.

Por fim, em relação à potência elétrica entregue a uma carga resistiva - que é o objetivo deste trabalho - é possível substituir a tensão elétrica obtida nos terminais do dispositivo termelétrico, deixando o cálculo da potência elétrica em função da diferença de temperatura, do coeficiente de Seebeck e da resistência da carga que esteja sendo alimentada pelo gerador, conforme a equação (2.6).

$$P_{TE} = \frac{(\Delta T \cdot \alpha)^2}{R_{CARGA}} \quad (2.6)$$

Onde

- P_{TE} é a potência termelétrica
- ΔT é a diferença de temperatura entre as faces da célula termelétrica
- α é o coeficiente de Seebeck
- R_{CARGA} é a resistência elétrica da carga alimentada pelo gerador

2.4. ENERGIA HELIOTÉRMICA (TERMO SOLAR)

O Sol é a maior fonte de energia que incide em nosso planeta. Além de indispensável para a nossa existência, sua energia é também usada há séculos para funções produtivas. Desde o século VII a.C. se tem indícios de uso de vidro para concentrar a luz do Sol para acender fogueiras. De lá para cá, a concentração do Sol através de lentes vem sendo usada até como arma de guerra, dentre outros.

Ao que diz respeito a geração de energia elétrica, em 1866 Augustin Mouchot usou concentradores parabólicos para produzir vapor d'água para movimentar motor a vapor. Em 1869 publicou o livro *“La Chaleur Solaire et ses applications industrielles”* (MOUCHOT, 1869). Mas a primeira usina operacional foi construída na Itália em 1968 pelo professor Giovanni Francia (SILVI, 2014).

Já em 1982 foi construída a Solar One, nos Estados Unidos, com 10 MW de potência. Desde então, grandes projetos surgiram ao redor do mundo, como as torres PS10 e PS20 na Espanha, Ivanpah nos EUA, Ashalim em Israel (BBC, 2017).

No Brasil, a Chamada de Projeto Estratégico 19/2015 da ANEEL intitulada “DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA NACIONAL DE GERAÇÃO HELIOTÉRMICA DE ENERGIA ELÉTRICA”, convoca os setores produtivos envolvidos a apresentarem projetos de nacionalização da tecnologia, onde visa aproveitar o potencial brasileiro de produção de energia com esta tecnologia. O documento aponta ainda o elevado potencial das regiões semiáridas no Nordeste do país para este tipo de tecnologia (ANEEL, 2015).

Em 2017, a CESP iniciou a construção de uma usina heliotérmica em agregação ao complexo de energias renováveis do Porto Primavera, às margens do Rio Paraná, divisa entre os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná.

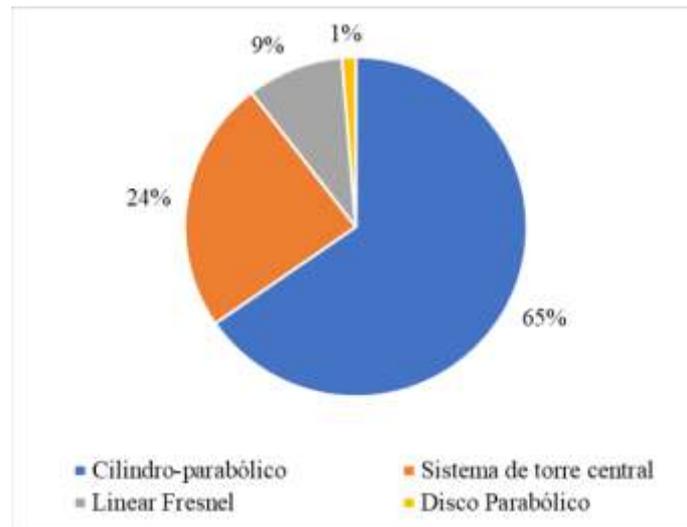
Em 2018, um dos trabalhos do **Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS**, traz em seus resultados uma tabela contendo itens necessários para criação de sistemas de geração Heliotérmica, com indicação em termos percentuais do potencial de nacionalização, conforme exposto na Tabela 4.

Tabela 4– Potencial de Nacionalização dos equipamentos para geração Solar (RETORTA et al., 2018).

SUBSISTEMA	EQUIPAMENTOS	POTENCIAL DE NACIONALIZAÇÃO (%)
Bloco de potência - indústria de aço e engenharia mecânica	Turbina a vapor	100%
	Torre de resfriamento	100%
	ETA - Estação de Tratamento de Água/Sistema de Desmineralização	100%
	Trocador de calor	100%
	Condensador	100%
	Transformador/painéis elétricos/cubiculos	100%
	Estruturas metálicas	100%
	Tubulações alta, média e baixa pressão	100%
Sistema de transferência de calor - indústria química e de aço	Isolamento térmico	100%
	Bombas/válvulas para fluido térmico	50%
	Instrumentação	50%
	Tanques/reservatórios de água quente, fria, armazenamento	50%
	Fluido térmico (óleo ou sal fundido)	0%
Campo Solar - indústria de vidro	Tubos receptores	0%
	Painéis/espelhos	0%
Projeto, construção e logística	Capacitação de mão de obra de engenharia, projeto, instalação e montagem	100%

As tecnologias de concentração Solar mais usadas na atualidade são Cilindro Parabólico, Torre Central, Linear Fresnel e Disco Parabólico, respectivamente (NASCIMENTO *et al.*, 2020). Na Figura 31 é possível observar a predominância de uso da tecnologia de cilindro parabólico nas usinas existentes no mundo.

Figura 31– Concentradores usados em usinas no mundo.



Fonte: (NASCIMENTO *et al.*, 2020)

Em 2018, na Universidade Federal de Santa Catarina, foi publicado um artigo sobre o desenvolvimento de um coletor Solar do tipo Linear Fresnel. A partir deste modelo é produzido vapor de água com mais de 200 °C. Com o incremento de um absorvedor móvel, este projeto teve uma redução de perdas de 39,17 % (CÉSAR *et al.*, 2018; CRUZ SANTOS *et al.*, 2019). A Figura 32 mostra uma fotografia do sistema de concentração Solar da UFSC

Figura 32- Estação de pesquisa heliotérmica da UFSC



Fonte: (CRUZ SANTOS *et al.*, 2019)

A tendência de pesquisa no âmbito da geração de energia Heliotérmica, tanto para geração de energia elétrica quanto para a geração de calor para produção industrial já faz parte do escopo nacional, onde empresas relacionadas já iniciaram projetos piloto, acordos de produção, projetos estratégicos e experimentos. Sendo assim, há uma expectativa de nacionalização dos recursos necessários para utilização destas tecnologias.

Figura 33- Primeira usina heliotérmica do Brasil. Rosana, São Paulo.



Fonte: (FUCUCHIMA, 2022)

A usina de Rosana, São Paulo (Figura 33), entrou em operação em março de 2022, com capacidade de 500 kW. Se utiliza da tecnologia de calhas parabólicas para concentrar a luz do Sol, produzindo elevadas temperaturas. O destaque desta tecnologia é a possibilidade de armazenamento de calor, bem como o aproveitamento do calor em aplicações industriais. A usina começou a ser desenvolvida em 2017 pela CESP com um investimento de 57 milhões de Reais.

A criação desta usina piloto inicia uma corrida pela nacionalização dos elementos necessários para sua produção, na tentativa de atualização da Tabela 4 para que todos os itens possuam a marca de 100 % nacional.

2.4.1 Análise numérica

O aquecimento de fluido por concentração Solar depende de diversas variáveis relacionadas tanto com as condições meteorológicas, quanto com as características construtivas dos elementos, além de todo o conceito da termodinâmica.

Para conseguir relacionar a área de um concentrador Solar com a quantidade de água quente produzida, é necessário considerar as seguintes afirmações:

- O calor em questão é proveniente da energia Solar, que por sua vez incide de maneira diferente a depender da localização geográfica e da estação do ano;
- Um concentrador Solar tem sua eficiência determinada por diversos fatores, como a qualidade do material usado em sua construção, por exemplo;
- O fluido pode se comportar de diferentes maneiras, considerando desde sua composição química, até sua temperatura de entrada no sistema

A primeira análise a ser considerada é a relação entre a energia do Sol entregue ao concentrador, através da equação (2.7.)

$$E_E = P_{sol} \cdot A_{con} \quad (2.7)$$

Onde

- E_E é a energia de entrada (W)
- P_{sol} é a potência Solar que incide no concentrador (Wp)
- A_{con} é a área do concentrador (m²)

Já a parte dessa energia que é absorvida pelo fluido depende da eficiência do sistema de concentração.

$$E_{abs} = E_E \cdot \eta \quad (2.8)$$

Onde

- E_{abs} é a energia absorvida (W)
- E_E é a energia de entrada (W)
- η é a eficiência do concentrador (%)

Quando a energia é entregue ao fluido, sua temperatura se eleva conforme a taxa de transferência de calor e a área do concentrador

$$\dot{Q} = m \cdot C_p \cdot (T_s - T_e) \quad (2.9)$$

Onde

- \dot{Q} é a taxa de transferência de calor para o fluido (J/s)
- C_p é a capacidade térmica do fluido (J/kg.K)
- \dot{m} é a massa do fluido (kg/s)
- T_s é a temperatura de saída (K)
- T_e é a temperatura de entrada (K)

Esta mesma taxa de transferência de calor se relaciona com a área do concentrador da seguinte forma:

$$\dot{Q} = U \cdot A_{sai} \cdot (T_s - T_{amb}) \quad (2.10)$$

Onde

- A_{sai} é a área do concentrador (m²)
- U é o coeficiente global de transferência de calor (W/m².°C)
- T_s é a temperatura de saída (°C)
- T_{amb} é a temperatura ambiente (°C)

Quando as duas equações são comparadas, se torna possível relacionar a temperatura de saída do fluido com a área do concentrador

$$m \cdot C_p \cdot (T_s - T_e) = U \cdot A_{sai} \cdot (T_s - T_{amb}) \quad (2.11)$$

$$(T_s - T_e) = \frac{(U \cdot A_{sai} \cdot (T_s - T_{amb}))}{(m \cdot C_p)} \quad (2.12)$$

Essa é uma análise simplificada que relaciona a área do concentrador Solar com a temperatura de saída do fluido, desconsiderando várias individualidades de cada parte do sistema.

Para atender a uma demanda específica, é necessário adotar valores razoáveis para algumas variáveis do sistema.

Por exemplo, para calcular a quantidade de área necessária para fornecer água quente a 150 °C com vazão de 2 L/min, é preciso considerar algumas afirmações:

- o modelo de concentrador é do tipo Calha Parabólica;
- o concentrador possui uma eficiência de 60 %;
- a densidade da água é de 1 kg/litro;
- o calor específico da água é aproximadamente 4,18 kJ/kg.°C;
- a temperatura com a qual a água adentra o sistema é de 25 °C.

Então é necessário relacionar estas grandezas conforme a equação (2.13).

$$A_{con} = \frac{Vz}{\eta \cdot D \cdot C_{esp} \cdot (T_s - T_e)} \quad (2.13)$$

Onde

- A_{con} é a área do concentrador (m²)
- Vz é a vazão (L/min)
- η é a eficiência do concentrador (%)
- C_{esp} é o calor específico (kJ/kg°C)
- T_s é a temperatura de saída (°C)
- T_e é a temperatura de entrada (°C)

Ao substituir os valores do exemplo e das afirmações, a equação fica conforme a seguir.

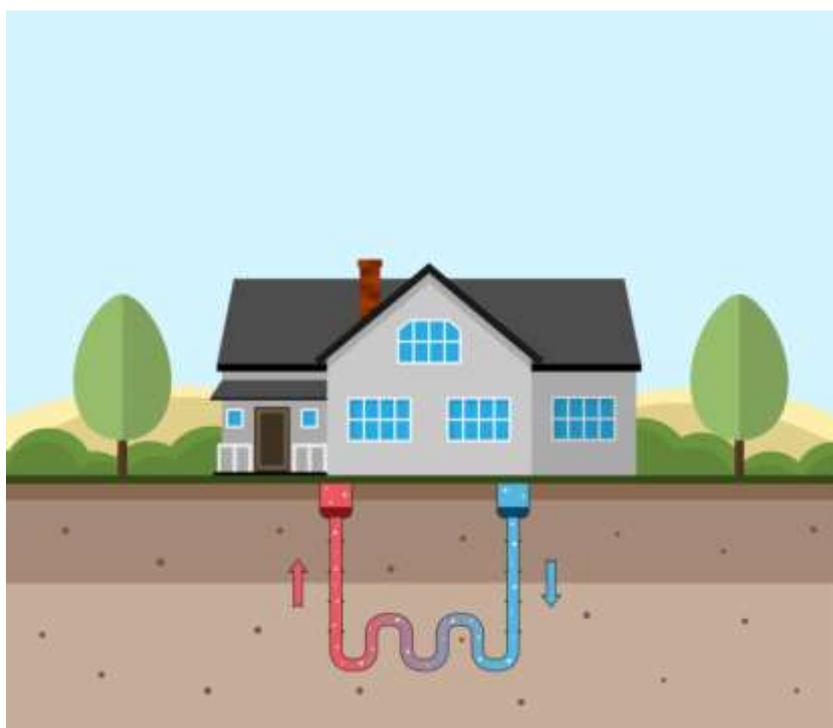
$$A_{con} = \frac{2 \text{ (L/min)}}{60\% \cdot 1 \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \cdot (150 - 25) \text{°C}} \quad (2.14)$$

Como resultado, a área de concentrador necessária para elevar a temperatura de uma água de 25 para 150 graus célsius a uma vazão de 2 litros por minuto é de 3,86 m².

2.5. ENERGIA GEOTÉRMICA

Energia Geotérmica consiste na utilização do subsolo como bomba de calor (GSHP - *Ground Source Heat Pump*) (Figura 34). A partir de uma profundidade de aproximadamente 3 metros, o Solo tende a manter uma temperatura constante mesmo sob variações da temperatura na superfície. Conforme consta no capítulo 2.4, foi possível encontrar experimentalmente temperaturas estabilizadas em aproximadamente 18 °C. Nesta situação a temperatura ambiente estaria acima de 25 °C (BOUGHANMI *et al.*, 2015).

Figura 34 – Esquema simplificado de um sistema geotérmico



Fonte: (GRIFFITH, 2019)

Em países com temperaturas ambientes mais baixas ou mesmo abaixo de zero, o subsolo fornece temperaturas elevadas, como no caso dos conhecidos Gêiseres, onde eventualmente se encontram piscinas naturais com águas mornas usadas para fins recreativos e até medicinais.

A tecnologia de climatização geotérmica vem sendo estudada para aplicações prediais, na intenção de reduzir o consumo de energia elétrica proveniente dos aparelhos de ar-condicionado, que podem chegar a representar cerca de 50 % do consumo de energia elétrica de uma edificação.

Embora ausente na matriz brasileira, esta tecnologia vem sendo aplicada há mais de 80 anos ao redor do mundo. Só nos EUA são instaladas cerca de 40.000 bombas geotérmicas por ano.

Em 2016 o Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs (PBH) do Ministério do Meio Ambiente, realizou um seminário sobre “SISTEMAS DE ÁGUA GELADA”, onde em uma de suas palestras foi relatada uma instalação de um sistema geotérmico predial que funciona desde 2001 com eficiência tanto para resfriamento quanto para aquecimento (GUIMARÃES, 2016).

Embora a tecnologia não seja recente, o Brasil ainda carece de pesquisas relacionadas a seu potencial, tendo em vista que sua aplicação é mais procurada para produção e vapor a ser usado em máquinas térmicas. Porém, sua utilização como estabilização térmica é promissora e conveniente a esta pesquisa.

2.5.1 Análise numérica

A análise da capacidade de transferência de calor do subsolo depende de diversos fatores. Para cada Solo, diferentes combinações de materiais e densidade podem promover diferentes propriedades térmicas. Estas peculiaridades podem interferir no dimensionamento de uma bomba de calor geotérmica.

Para viabilização desta pesquisa, serão consideradas condições referentes a estudos de caso presentes em artigos contidos na revisão bibliográfica deste trabalho.

Algumas equações básicas podem guiar o dimensionamento de uma bomba geotérmica.

Quantidade de calor transportado pela água

$$Q_{agua} = m \cdot cp \cdot (T_e - T_s) \quad (2.15)$$

Onde

- $Q_{\text{água}}$ é o calor em J (Joules)
- m é a vazão mássica da água na tubulação ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
- T_e é a temperatura de entrada ($^{\circ}\text{C}$)

- T_s é a temperatura de saída (°C)
- C_p é o calor específico

Já a tubulação terá sua troca de calor dada pela lei de Fourier.

$$\dot{Q}_{tubo} = \frac{-kA(T_{ex}-T_{int})}{l} \quad (2.16)$$

Onde

- \dot{Q}_{tubo} é a taxa de transmissão de calor (kJ.s^{-1})
- k é a condutividade térmica
- A é a área da superfície (m^2)
- l é o comprimento da parede
- T_{ex} é a temperatura externa (°C)
- T_{int} é a temperatura interna (°C)

A taxa de transferência de calor em relação ao comprimento da tubulação deve considerar a resistência térmica de cada componente.

$$\dot{Q} = \frac{(T_{solo} - T_{agua})}{R_{total}} \quad (2.17)$$

$$R_{total} = R_{agua} + R_{tubo} + R_{solo} \quad (2.18)$$

$$l = \dot{m} \cdot c_p \cdot R_{total} \cdot \ln \left[\frac{T_{solo} - T_{agua\ ent}}{T_{solo} - T_{agua\ sai}} \right] \quad (2.19)$$

Onde

- \dot{Q} é a quantidade de calor (kJ.s^{-1})
- T_{Solo} é a temperatura do Solo em contato com o tubo
- $T_{\text{água}}$ é a temperatura da água dentro do tubo
- R_{total} é a resistência térmica total
- $R_{\text{água}}$ é a resistência térmica da água
- R_{tubo} é a resistência térmica das paredes do tubo
- R_{Solo} é a resistência térmica do Solo
- \dot{m} é a vazão mássica da água
- c_p é o calor específico

Trazendo o foco para o tamanho do trocador de calor, sua capacidade térmica pode ser calculada em relação à diferença de temperatura entre a água e o Solo.

$$\dot{Q}_{solo/agua} = \frac{l_{tubo}(T_{solo} - T_{agua})}{R_{total}} \quad (2.20)$$

Onde

- $\dot{Q}_{solo/agua}$ é a taxa de transmissão de calor ($\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$)
- l_{tubo} é o comprimento do tubo (m)
- T_{solo} é a temperatura média do Solo
- T_{agua} é a temperatura média da água
- R_{total} é a resistência térmica total

Por exemplo, baseando-se na equação (2.15), para resfriar água desde uma temperatura de 150 °C para a temperatura de 25 °C a uma vazão de 2 litros por minuto, é necessário que o sistema entregue ao subsolo uma quantidade de calor de aproximadamente 1000 kJ/min.

2.6. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou o estado da arte contendo diversas pesquisas relacionadas aos temas indispensáveis para este trabalho. Para uma melhor compreensão do contexto geral, os trabalhos foram agrupados por tecnologia e organizados por data. Os temas abordaram uma diversidade de aplicações para o resfriamento de fluido através da troca de calor com o subsolo, várias estratégias de aproveitamento da luz do Sol para aquecimento de fluido e ainda diversas pesquisas de conversão de calor em energia elétrica com o uso de dispositivos termelétricos.

O uso destas tecnologias separadamente já possui um leque de possibilidades de utilização. A combinação de algumas delas propõe algo inovador. Já a combinação das três tecnologias se torna mais raro e pouco explorado.

Haver possibilidade de obtenção das condições necessárias para geração de energia elétrica por termelétricidade direta já é de grande contribuição para a comunidade científica, tornando possível investir em mais pesquisa e desenvolvimento de materiais com maior eficiência e melhor desempenho. Quando estas condições são obtidas por métodos passivos, naturais e sustentáveis, as expectativas se tornam ainda mais positivas com relação aos resultados desta conversão.

Embora existam outras tecnologias tanto para aquecimento quanto para resfriamento passivos, a escolha por estas tecnologias veio pela facilidade de implementação nas regiões com maior necessidade de desenvolvimento socioeconômico, a exemplo do sertão paraibano, além de serem pouco exploradas dentro deste contexto.

O aquecimento por concentração solar já não é novidade na matriz energética de vários países. Inclusive, novas usinas já estão em funcionamento na América Latina. Isso significa mais investimento em pesquisa e desenvolvimento de equipamentos que possam servir a este propósito.

O condicionamento geotérmico já é uma realidade na construção civil, onde sua aplicação, embora não seja unânime, é comum e factível, cabendo ao momento de sua implementação uma investigação a respeito da capacidade de escoamento térmico do subsolo daquele local.

Este capítulo abordou ainda os conceitos básicos a respeito das tecnologias consideradas para o desenvolvimento deste trabalho. Embora fosse apenas com fins teórico-conceituais, a análise matemática básica serviu para dar estimativa de dimensões e quantidade de energia envolvida, auxiliando na confecção de modelos computacionais para simulação de cada fenômeno.

CAPÍTULO 3

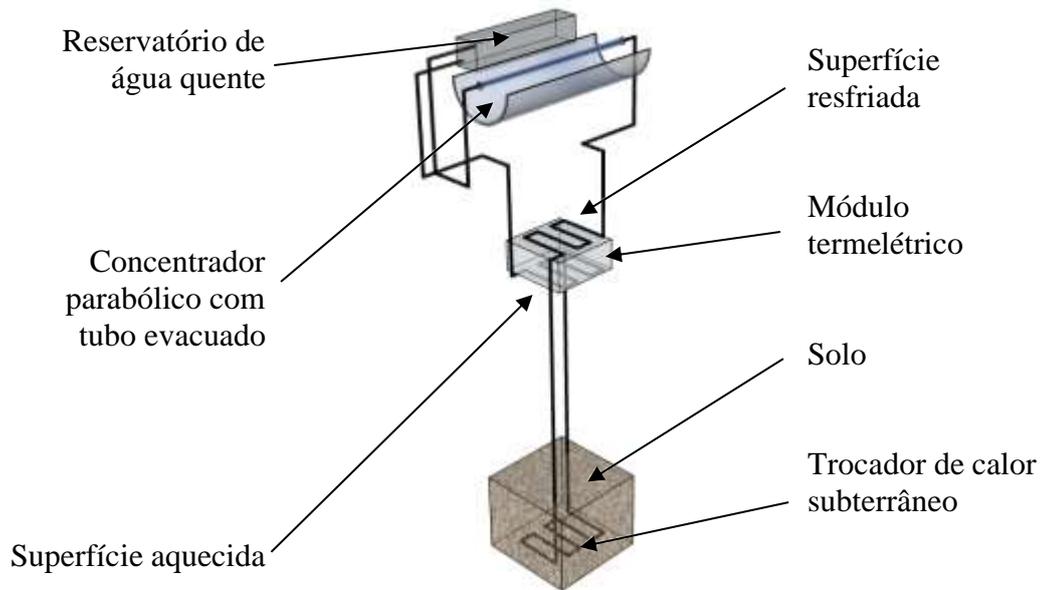
MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho de tese consiste em conceber e caracterizar de maneira simulada e experimental um gerador de energia elétrica baseado em energia Solar, energia geotérmica e módulos termelétricos. O princípio é gerar energia elétrica através da conversão direta de fluxo de calor em eletricidade, ao receber energia térmica proveniente da troca de calor com um fluido aquecido por energia Solar e resfriado por energia geotérmica.

3.1. Ideia inicial

Na Figura 35 está apresentado um esboço da proposta do gerador de energia elétrica. Neste caso, o concentrador Solar parabólico recebe a luz Solar e por radiação transfere calor para o tubo evacuado que aquece o fluido que se encontra naquele volume. Após aquecido, o fluido passa a se mover através do efeito termossifão, em direção ao reservatório de água quente. Em seguida o fluido segue em direção à “superfície aquecida” que se encontra na parte inferior do “módulo termelétrico”. O fluido aquecido entrega calor ao módulo termelétrico e segue para o “trocador de calor subterrâneo” a uma profundidade de 3 metros da superfície do “Solo” (profundidade de temperatura constante). Ali o fluido perde calor para o Solo e segue em direção à superfície resfriada, que se encontra na parte superior do módulo termelétrico. O fluido resfriado absorve o calor do módulo termelétrico e segue de volta para o concentrador Solar, dando início a um novo ciclo.

Figura 35- Esboço da estrutura



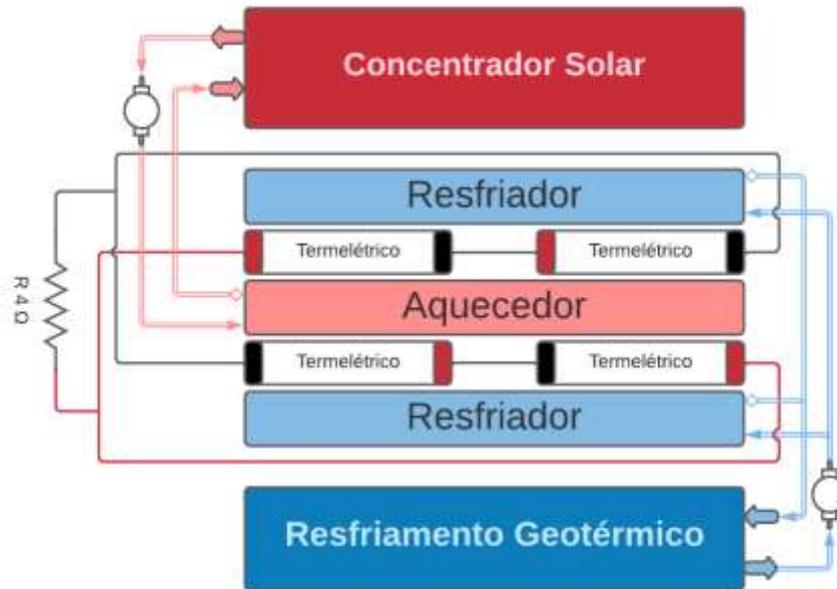
Fonte: (ALMEIDA; SOUTO; MOREIRA, 2022)

3.2. Modelo estudado

A partir da ideia inicial, o desenvolvimento deste trabalho culminou na concepção de um modelo de gerador de eletricidade pelo princípio da termoeletricidade direta, cuja diferença de temperatura foi obtida por aquecimento Solar e resfriamento geotérmico. A organização dos elementos contidos no modelo é descrita através do fluxograma da Figura 36. O funcionamento deste fluxograma inicia-se no bloco “concentrador Solar”, cuja coloração em vermelho escuro representa a temperatura elevada do fluido aquecido por concentração Solar. O fluido aquecido é então bombeado em direção ao bloco “Aquecedor”, onde sua temperatura é reduzida após a troca de calor com os blocos denominados “Termelétrico”. Em seguida o fluido retorna ao bloco “concentrador Solar” para ser aquecido novamente, reiniciando o ciclo do fluido aquecido. Concomitantemente, o bloco “Resfriamento Geotérmico” mantém o fluido a uma temperatura mais baixa, através troca de calor com o subsolo. O fluido resfriado é bombeado em direção aos blocos denominados “Resfriador” onde absorve calor dos módulos termelétricos, ficando um pouco mais quente. Por fim, o fluido de resfriamento retorna para o reservatório geotérmico para ser resfriado novamente, dando início a um novo ciclo. Esta disposição dos blocos trocadores de calor foi escolhida por ter um melhor aproveitamento do calor que irradia do bloco “Aquecedor” de maneira omnidirecional. Os módulos termelétricos posicionados entre os trocadores de calor recebem um fluxo de calor contínuo de sentido único, seguindo do bloco “Aquecedor” em

direção aos blocos “Resfriador”, promovendo o fenômeno termelétrico descrito por Seebeck. Nesta condição, cada módulo termelétrico funciona como uma fonte de energia elétrica de natureza contínua. Para otimizar o desempenho do gerador elétrico, os módulos termelétricos foram associados de forma mista, aumentando tanto o valor da tensão, quanto o valor da corrente elétrica entregues à carga resistiva “ $R_{4\Omega}$ ”.

Figura 36– Fluxograma de associação de tecnologias com identificação de fluxo.



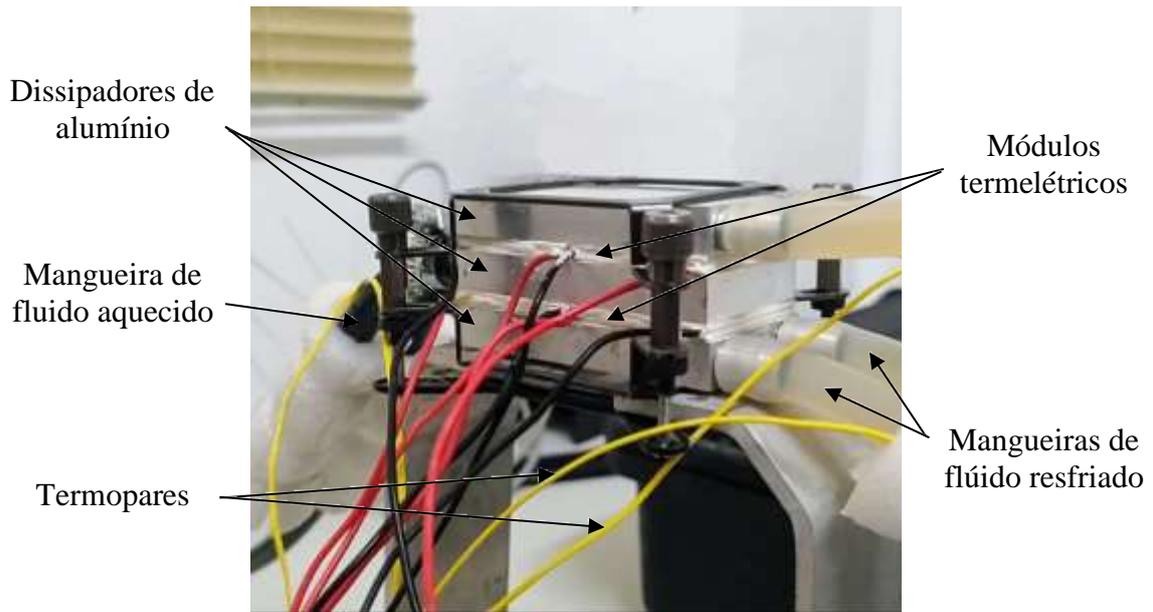
Fonte: o autor

Para comprovar a eficácia deste modelo, foi desenvolvida uma bancada experimental capaz de emular diferentes condições de circulação de fluxo, permitindo observar o desempenho dos módulos termelétricos na condição de geradores de eletricidade, bem como o comportamento térmico dos blocos trocadores de calor durante seu funcionamento.

3.3. Emulação do modelo principal

A estrutura descrita no fluxograma da Figura 36 foi montada em laboratório e fixada em uma estrutura de bancada conforme Figura 37. Na foto, as mangueiras de cor clara (à direita) são responsáveis pela circulação do fluido resfriado, enquanto as mangueiras de cor preta (à esquerda) são responsáveis pela circulação do fluido aquecido. Os fios amarelos são os termopares do tipo K, usados para a leitura da temperatura dos fluidos. Os fios vermelho e preto são os terminais elétricos das células termelétricas.

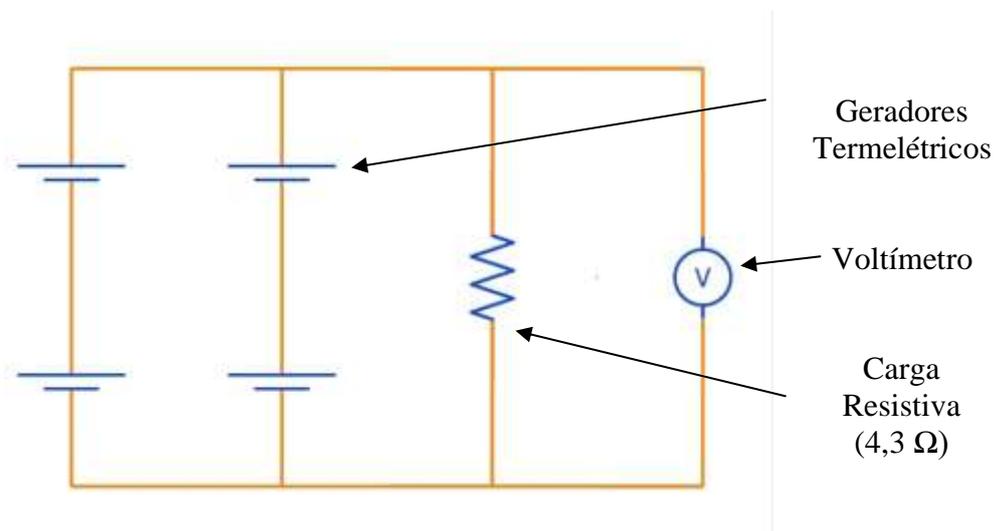
Figura 37– Foto da montagem da estrutura do núcleo do modelo principal.



Fonte: o autor

Os blocos de alumínio estão dispostos da mesma maneira que os blocos denominados “Aquecedor” e “Resfriador” do fluxograma da Figura 36. Entre os blocos dissipadores de alumínio, estão acomodados os módulos termelétricos acrescidos de uma fina camada de pasta térmica. Os terminais elétricos dos módulos termelétricos estão conectados de modo que os associa eletricamente de forma mista, conforme descrito anteriormente. A associação elétrica dos módulos termelétricos tem seu circuito elétrico equivalente ilustrado na Figura 38.

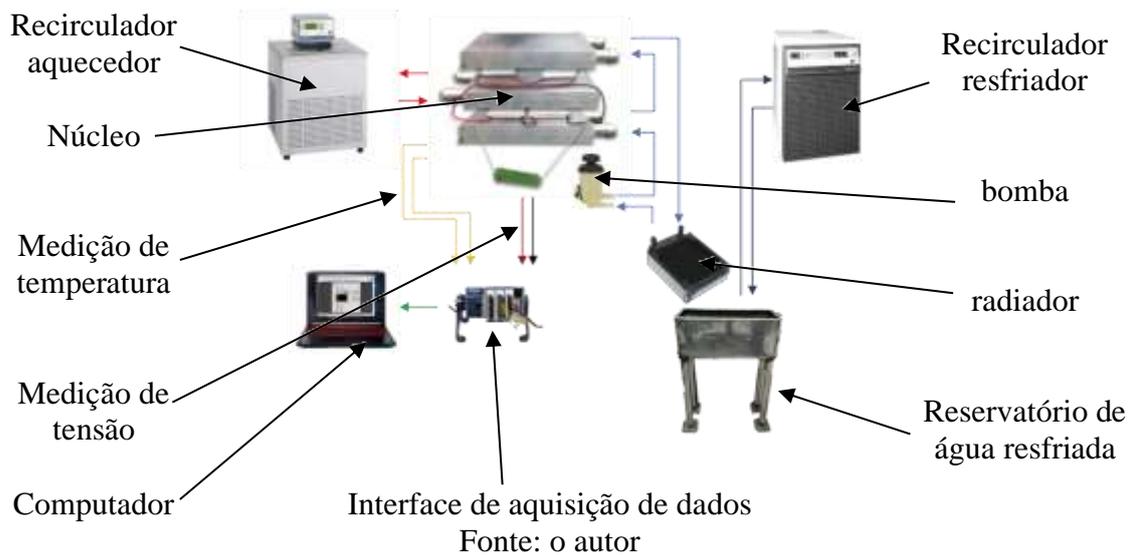
Figura 38– Circuito elétrico equivalente da associação de geradores termelétricos.



Fonte: o autor

A montagem da bancada experimental está ilustrada na Figura 39 onde é possível identificar os elementos “Recirculador aquecedor”, “Recirculador resfriador”, responsáveis pelo fornecimento dos fluidos condicionados. Também é possível identificar o sistema passivo de troca de calor, composto por um “radiador” e uma “bomba” conectados ao “Núcleo” (os termos entre aspas referem-se aos componentes da estrutura).

Figura 39– Estrutura de análise experimental.



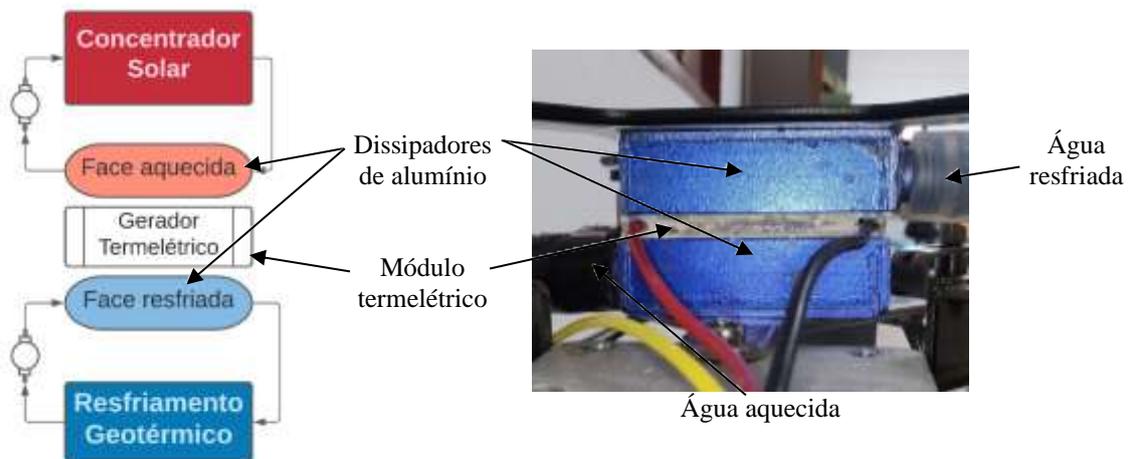
O funcionamento deste aparato experimental inicia-se pelo “Recirculador aquecedor” responsável por fornecer ao sistema um fluido aquecido a uma temperatura de 80 °C que circula pelo bloco de alumínio posicionado ao centro do “núcleo”. O fluido aquecido é bombeado até bloco aquecedor com uma vazão de 2 L/min, onde transfere calor para o lado quente de cada módulo termelétrico e então retorna para o recirculador. Concomitantemente, o “Recirculador resfriador” faz circular um fluido resfriado no “Reservatório de água resfriada”, mantendo ali uma temperatura constante de 20 °C. Estes dois sistemas descritos até aqui emulam o funcionamento de um sistema de concentrador Solar e de uma estaca geotérmica, respectivamente. Os blocos de alumínio dissipadores que estão na parte inferior e superior do “Núcleo” conectam-se através de mangueiras a uma “bomba” e um “radiador”, formando um trocador de calor passivo em circuito fechado. A bomba faz circular um fluido com vazão de 2 L/min passando pelos blocos resfriadores e pelo radiador. Para finalmente fornecer fluido resfriado ao núcleo do sistema como descrito

anteriormente, o “radiador” é então submerso no “Reservatório de água resfriada”, trocando calor com um fluido de temperatura constante de 20 °C, representando assim um sistema geotérmico ideal. A água que circula pelos blocos resfriadores extrai calor do lado frio de cada módulo termelétrico, concluindo assim um fluxo contínuo de calor que passa através dos módulos termelétricos, ativando neles o efeito Seebeck. A tensão elétrica produzida pelo efeito termelétrico é finalmente entregue à carga resistiva.

3.4. Modelo Simplificado

Para chegar ao modelo de gerador proposto neste trabalho descrito em 3.2 e 3.3, foi necessário desenvolver um modelo simplificado onde fossem feitas análises dos fenômenos envolvidos na conversão direta de fluxo de calor em energia elétrica em sua menor composição. Um fluxograma do modelo simplificado e sua montagem experimental estão expostos na Figura 40.

Figura 40 – Versão simplificada do modelo.



Fonte: o autor

A análise do fluxograma de versão simplificada do modelo mostrada na Figura 40 inicia-se no bloco “Concentrador Solar”, responsável pelo aquecimento do fluido que circula até o bloco dissipador “Face aquecida” em circuito fechado. O fluido que se encontra no bloco “Face aquecida” troca calor com a face quente do bloco “gerador termelétrico”. Na parte inferior do fluxograma está o circuito fechado de resfriamento, onde o fluido que se encontra no bloco “Face resfriada” extrai calor do sistema segue por bombeamento até o bloco “Resfriamento geotérmico” onde é resfriado à temperatura do subsolo. Com a troca

de calor simultânea com o fluido aquecido na parte superior e o fluido resfriado na parte inferior, o “gerador termelétrico” fica exposto a uma diferença de temperatura, ativando o efeito Seebeck.

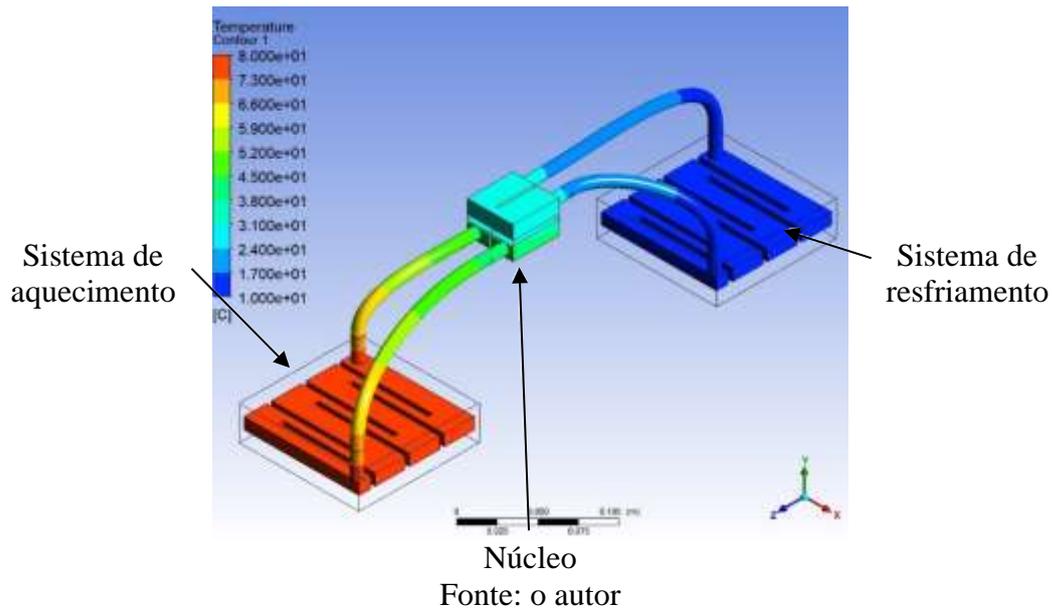
Ainda na Figura 40 observa-se a montagem do núcleo do modelo simplificado, composto por dois blocos de alumínio dissipadores com passagem de fluido acomodados nas faces de um dispositivo termelétrico que se encontra ao centro da estrutura. Pelo bloco de alumínio que se encontra na parte superior da fotografia circula um fluido resfriado que vem diretamente do recirculador resfriador. O bloco inferior recebe a circulação de fluido aquecido, proveniente de outro recirculador. Ao centro encontra-se um módulo termelétrico comercial comum, que entrega a energia elétrica produzida pelo efeito Seebeck a uma carga resistiva de $4,3 \Omega$. O valor da carga foi determinado experimentalmente para máxima transferência de potência.

Esta montagem permite a análise do comportamento térmico dos blocos dissipadores de calor, mediante uma brusca variação de temperatura. Este comportamento foi capturado com o uso de uma câmera termográfica Flir® e os valores de temperatura medidos por sensores conectados nas entradas e saídas dos fluidos com a interface de aquisição NI 9211®. Além do comportamento térmico, também é possível analisar o gerador elétrico em pleno funcionamento com a leitura em tempo real de tensão e potência elétricas, feita através da interface de aquisição de dados NI 9201®. As informações adquiridas pelas interfaces de aquisição foram tratadas e armazenadas através de um sistema de aquisição de dados computadorizado.

3.5. Simulação do modelo simplificado

Para uma análise computacional do comportamento térmico da passagem do fluido pelos blocos dissipadores em contato com o módulo termelétrico, foi elaborado o desenho do modelo simplificado, capaz de representar a montagem realizada na análise experimental.

Figura 41 – Desenho computacional do modelo simplificado.



Na figura Figura 41 o bloco em vermelho (à esquerda) representa o recirculador aquecedor, que corresponde ao coletor Solar. O bloco em azul (à direita) representa o recirculador resfriador, correspondendo ao sistema geotérmico. Ao centro se encontra o “núcleo”, composto por dois blocos de alumínio e um bloco maciço correspondente ao módulo termelétrico. Os blocos de alumínio deste desenho correspondem a modelos comerciais com dimensões 40 mm x 40 mm x 12 mm. A resistência térmica de contato foi desconsiderada na simulação devido ao uso de pasta térmica na montagem da estrutura experimental.

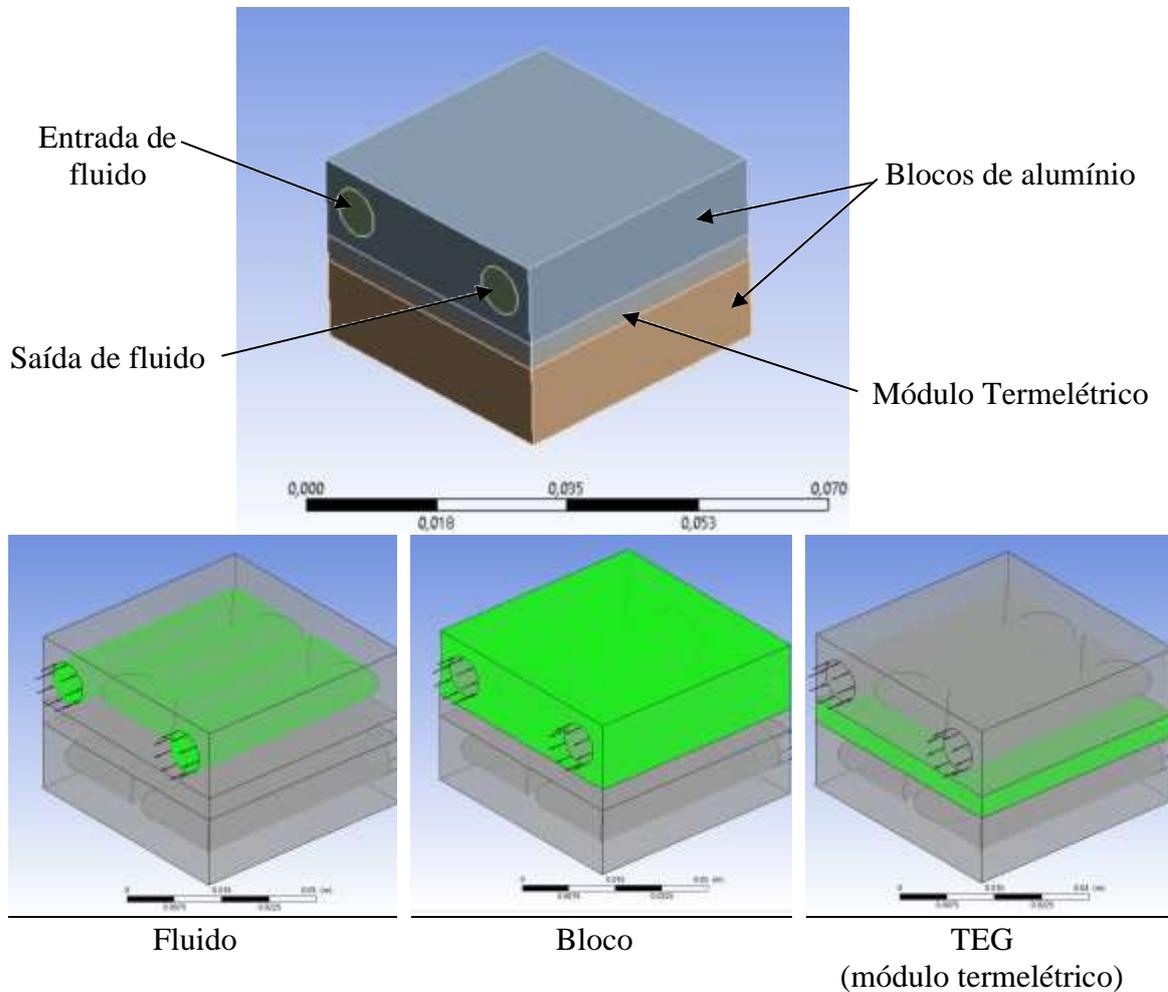
3.6. Volumes finitos

Para realizar uma análise detalhada sobre o comportamento de cada elemento aqui analisado, foi aplicado o método de Volumes Finitos com o auxílio de simulação em computador. O método de volumes finitos é uma técnica de resolução de equações diferenciais para fenômenos físicos. Com essa técnica, fenômenos como transferência de calor podem ser analisados em pequenos pedaços de uma grande estrutura.

Tendo em vista que as temperaturas dos fluidos resfriado e aquecido foram adotadas baseando-se nos resultados encontrados na revisão bibliográfica, os testes de condições de contorno foram aplicados apenas na região do núcleo do sistema, considerando apenas os dissipadores de calor acoplados ao dispositivo termelétrico e dispensando os blocos que

representam os recirculadores. Esta redução do modelo impacta diretamente no uso de recursos computacionais, reduzindo o tempo de simulação, porém sem comprometer a análise necessária para o funcionamento do modelo proposto.

Figura 42– Desenho computacional simplificado para simulação.



Fonte: o autor

As condições de contorno usadas nesta simulação foram configuradas no programa Ansys® CFX com os seguintes valores:

Tabela 5- Condições de contorno configuradas no Ansys® CFX.

Condição	Fluido Aquecido	Fluido Resfriado	Bloco	TEG
Material	Water	Water	Aluminium	Brick Common
Velocidade de entrada	10 kg/s	10 kg/s		
Temperatura de entrada	80 °C	10 °C		
Turbulência	5%	5%		

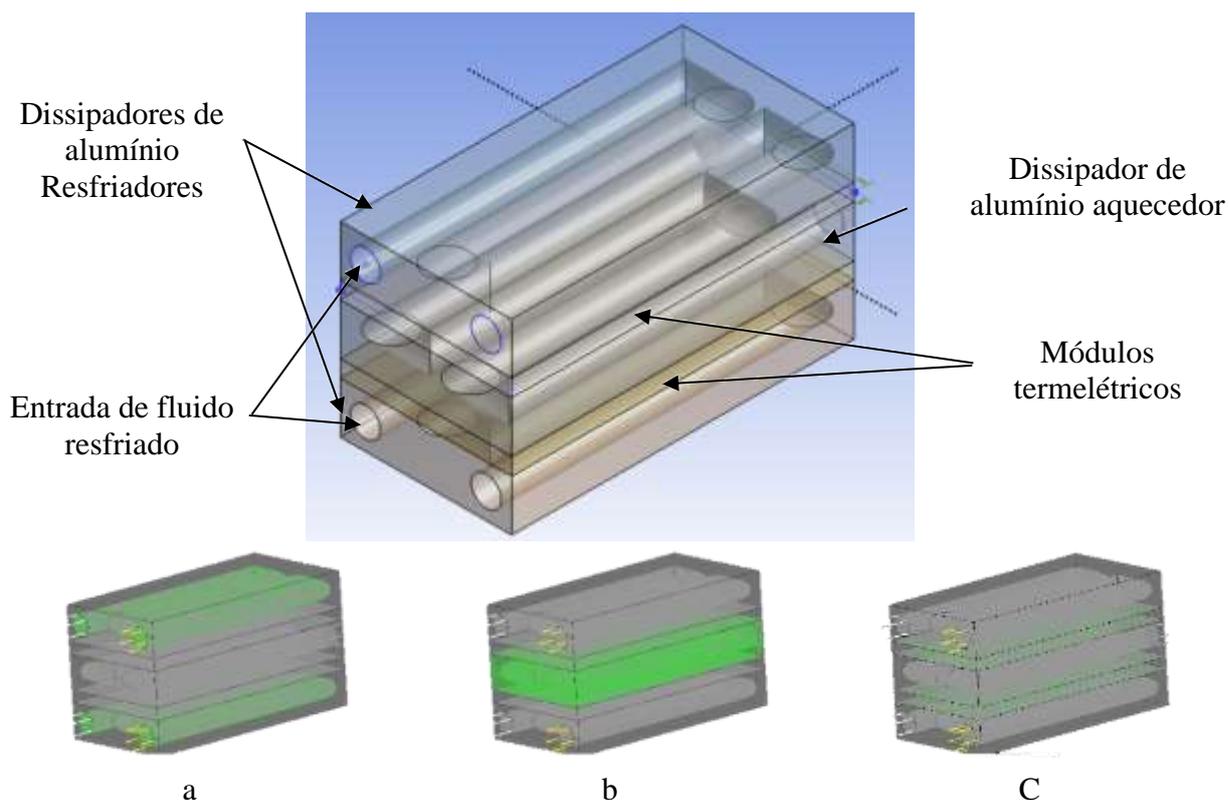
Velocidade de saída	Pressão ambiente	Pressão ambiente		
Temperatura externa			25 °C	25 °C
Coefficiente de Transferência de Calor			5 W/m ² K	5 W/m ² K

Obs.: Os termos utilizados na tabela estão adaptados literalmente aos parâmetros de configuração do programa de simulação. Por exemplo, o campo “velocidade de entrada” corresponde a vazão mássica, conforme sua unidade de medida.

3.7. Simulação do modelo principal

Após a análise do modelo simplificado, foi elaborado um desenho computacional correspondente ao modelo principal proposto na Figura 36, com as mesmas condições de contorno admitidas a partir da revisão bibliográfica. Para fins de simulação, também foram desconsiderados os sistemas de aquecimento e resfriamento, concentrando a análise apenas no núcleo do sistema. Este desenho baseia-se em modelos de blocos dissipadores comerciais com dimensões de 80 mm x 40 mm x 12 mm.

Figura 43– Desenho do modelo proposto.



Fonte: o autor

Na Figura 43 observa-se na parte superior e inferior os blocos de alumínio responsáveis pela circulação do fluido resfriado (a). Na parte central do modelo encontra-se o bloco de alumínio responsável pela circulação de fluido aquecido (b). Entre os blocos de aquecimento e resfriamento estão os blocos que representam o que seriam os módulos termelétricos (c).

As condições de contorno aplicadas nesta simulação consideram os valores de temperatura escolhidos a partir da literatura. Para o fluido de aquecimento, foi considerada o material “*Water*” da biblioteca do Ansys® CFX, com uma temperatura de 80 °C e velocidade de 2 L/min na entrada do bloco aquecedor. Já o fluido de resfriamento entra simultaneamente nos blocos resfriadores com uma temperatura de 20 °C e uma vazão de 2 L/min. Os blocos que correspondem aos módulos termelétricos foram configurados com o material do tipo “*Brick Common*”, com um coeficiente de transferência de calor de 15 W/m²K, a uma temperatura externa de 25 °C. Os blocos de aquecimento e resfriamento foram configurados com o material “*Aluminium*”.

O funcionamento desta simulação é semelhante ao funcionamento do modelo experimental, descrito em 3.3, onde nas entradas de cada bloco resfriador é inserido um fluido resfriado, o qual circula por dentro do bloco em direção à saída, trocando calor com os módulos termelétricos pelas suas faces frias. Concomitantemente, é inserido um fluido aquecido na entrada do bloco aquecedor que circula pelo seu interior em direção à saída. Durante sua passagem, o fluido troca calor com os módulos termelétricos pelas suas faces quentes. Esta configuração fornece um fluxo de calor que se origina ao centro deste núcleo, em direção às partes superior e inferior do núcleo, passando através dos módulos termelétricos. Este fluxo de calor contínuo é o fenômeno necessário para a ativação do efeito Seebeck.

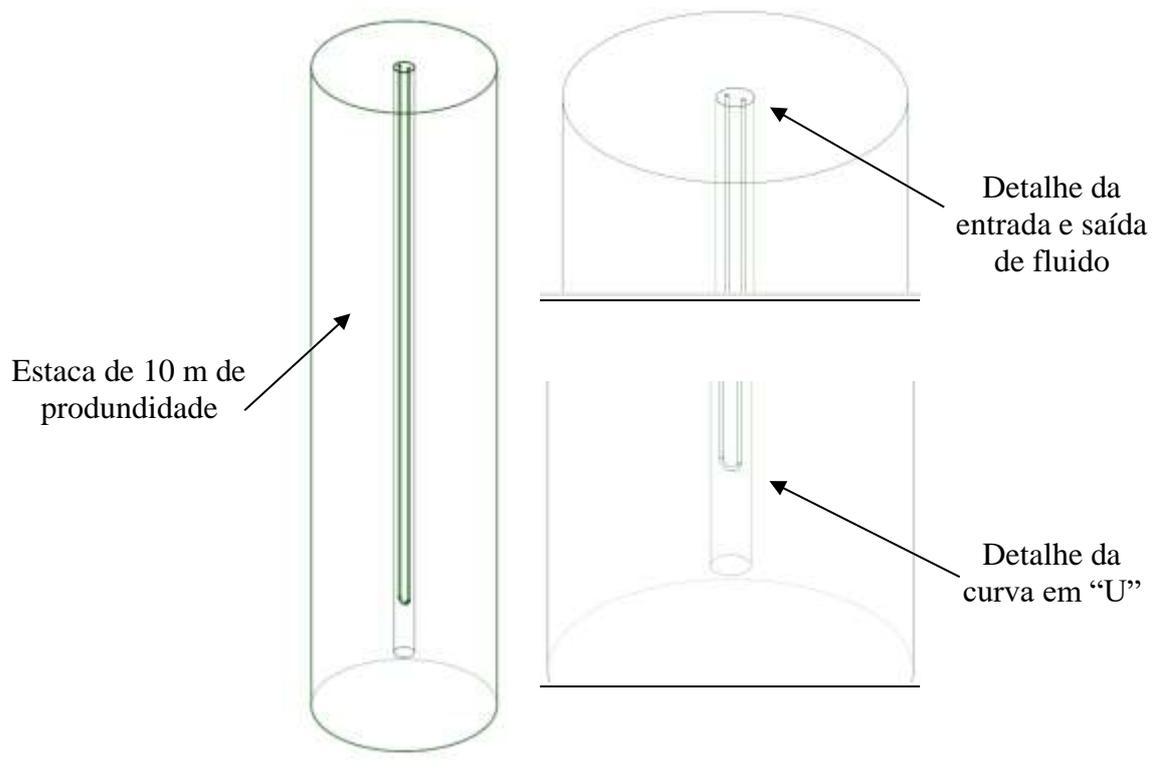
3.8. Simulação do sistema geotérmico

Para simular uma estaca geotérmica capaz de representar o processo de resfriamento do fluido, foi elaborado um modelo computacional com configurações baseadas em uma pesquisa realizada no Centro de Engenharia Geotécnica na Escola Politécnica da USP (ALMEIDA, Caique R. DE *et al.*, 2020; ALMEIDA, Caique Roberto De, 2021; ALMEIDA, Caique Roberto DE *et al.*, 2022). Na referida pesquisa, os autores desenvolveram um modelo computacional de uma estaca geotérmica que correspondia a um ensaio experimental, no

qual sua validação se deu por comparação dos resultados obtidos na simulação com os valores obtidos na análise experimental. Na ocasião, os autores efetuaram variações nas características da estaca geotérmica e nas propriedades dos elementos, a fim de analisar o comportamento da bomba de calor para cada situação.

A simulação foi então feita considerando uma estaca geotérmica de 10 metros de profundidade em uma amostra de Solo de 3 metros de diâmetro, uma estaca de concreto de 33 cm de diâmetro e tubos de cobre em “U” de 30 mm de diâmetro com 2 mm de espessura com passagem de água por seu interior. O desenho da Figura 44 é composto por quatro geometrias, sendo elas “Solo”, “Concreto”, “Tubo” e “Água”.

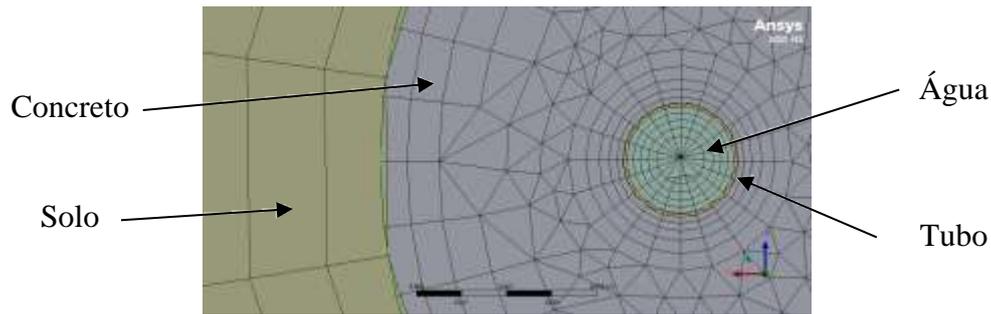
Figura 44 – Desenho computacional do modelo simplificado.



Fonte: o autor

A malha é formada por 1.950.997 nós (*Nodes*) e 6.176.486 elementos (*Elements*), com recursos de otimização de contato entre volumes (*Inflation*) e elementos com dimensões (*Element Size*) de 0,05 metros (Figura 45).

Figura 45 – Detalhe da malha.



Fonte: o autor

As condições de contorno da simulação consideram a entrada de água líquida na tubulação com temperatura de 80 °C e velocidade de 0,05 m/s, com turbulência de 5 %. O fluido foi configurado com coeficiente de transferência de calor de 500 W/m²K com temperatura ambiente de 30 °C. Já o tubo de cobre foi configurado com coeficiente de transferência de calor de 1000 W/m²K e o bloco de concreto com coeficiente de transferência de calor de 2 W/m²K. Para o Solo, foi considerado um modelo ideal com temperatura fixa de 20 °C. O material usado para representar o Solo foi “tijolo comum”, obtido da biblioteca principal do programa.

O desenho apresentado na Figura 44 possui características semelhantes ao modelo de referência mencionado no início deste tópico, porém, ao aplicar o valor inicial de temperatura considerado para esta pesquisa, o valor da temperatura de saída foi mais alto do que o desejado, se fazendo necessário alterar algumas características da estaca geotérmica, a fim de atingir os valores necessários para validação do experimento. Com a alteração no comprimento da estaca, o modelo apresentou os resultados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Variações de valores de condições de contorno.

Profundidade da estaca (m)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)
10 m	80	52,3
	40	34,4
	30	24,4
20 m	80	47,5
	40	33,4
	30	23,5

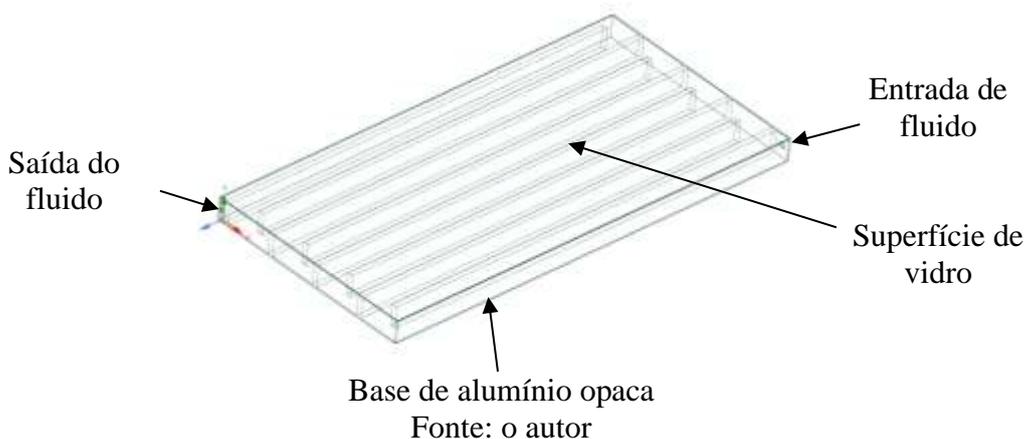
O avanço das pesquisas sobre geotécnica traz uma infinidade de possibilidades, levando em consideração sua localização geográfica e condições climáticas, além de uma ampla gama de fatores, tornando a escolha de um modelo uma tarefa específica para uma dada aplicação (ZAYED, M. E. *et al.*, 2023)

3.9. Simulação do sistema de aquecimento Solar

Na intenção de trabalhar com valores de temperatura com mais simplicidade de implementação, optou-se pelo coletor Solar plano para produção de fluido aquecido a temperatura inferior ao ponto de ebulição da água, evitando o uso de tubulação pressurizada e riscos à integridade física e patrimonial, porém sem comprometer o desempenho da pesquisa.

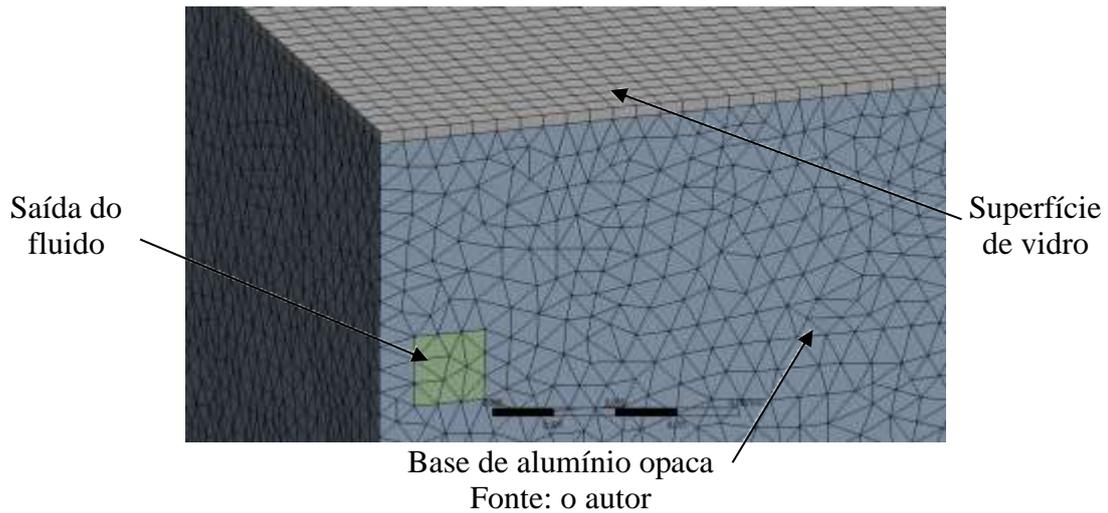
Para simulação do coletor Solar plano, foi elaborado um desenho computacional simplificado, composto por uma base de alumínio, uma superfície de vidro e circulação de água pelo seu interior, conforme Figura 46.

Figura 46 – Desenho computacional do coletor Solar plano.



O modelo foi confeccionado com dimensões de 4 m x 2 m x 0,2 m cuja base possui 8 aletas para desaceleração do fluido. A base de alumínio foi configurada com o material *Aluminum 1060-H12*. A superfície de vidro foi configurada com o material *96% Silica Glass* e fluido água. A malha foi composta por 1.041.275 nós e 3.972.017 elementos, com tamanho de 0,01 m para cada elemento.

Figura 47 – Detalhe da malha para o desenho do coletor Solar plano.



Para radiação Solar, foi utilizado o modelo *Rosseland* considerando a localização geográfica da UFPB ao 20 ° dia do mês 6 às 10:00 da manhã. A simulação rodou por 100 passos de 3600 segundos.

3.10. Simulação de módulo termelétrico

Por fim, para compreensão do funcionamento do módulo termelétrico em ocasião de conversão de fluxo de calor em energia elétrica, foi elaborado um desenho computacional composto por blocos semicondutores dopados associados entre si, levando em consideração a resistência de contato.

O elemento correspondente ao semicondutor do tipo P utilizado, foi configurado com os valores listados na Tabela 7. O elemento tipo N foi configurado com os mesmos valores contidos nesta tabela, porém com coeficiente de *Seebeck* de sinal negativo (-0,00018700 V/°C).

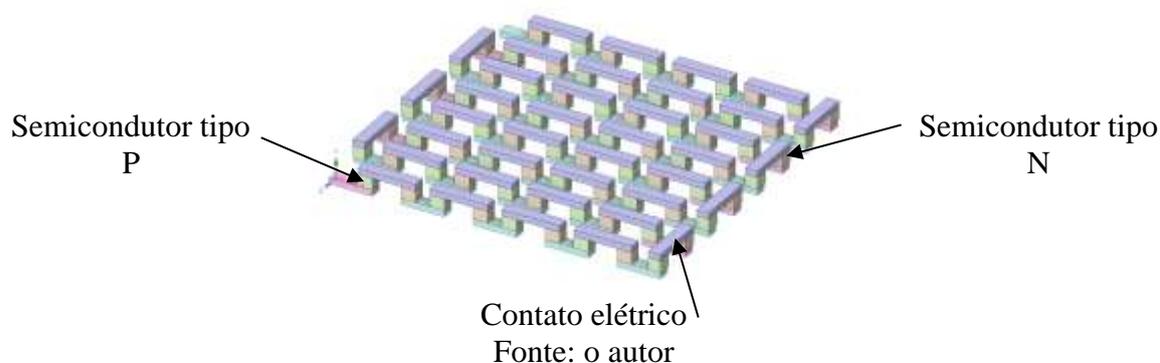
Tabela 7 – Composição do elemento semicondutor tipo P usado na simulação de uma célula termelétrica (tabela obtida diretamente do programa de computador).

P-TYPE	
Density	8300,0 kg/m ³
Structural	
Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	1,1e+11 Pa

Poisson's Ratio	0,34000
Bulk Modulus	1,1458e+11 Pa
Shear Modulus	4,1045e+10 Pa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1,8e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	0 Pa
Compressive Yield Strength	2,8e+08 Pa
Tensile Ultimate Strength	4,3e+08 Pa
Tensile Yield Strength	2,8e+08 Pa
Thermal	
Isotropic Thermal Conductivity	1,4600 W/m·°C
Isotropic Seebeck Coefficient	0,00018700 V/°C
Specific Heat Constant Pressure	385,00 J/kg·°C
Electric	
Isotropic Resistivity	1,64e-05 ohm·m
Magnetic	
Isotropic Relative Permeability	1,0000

A junção dos elementos semicondutores com contato elétrico por meio de condutor de cobre possui disposição favorável à circulação de corrente elétrica, favorecendo o fenômeno da termoelectricidade para geração de energia elétrica. O desenho do módulo está exposto na Figura 48.

Figura 48 – Detalhe da malha para o desenho do coletor Solar plano.



O funcionamento do modelo segue a descrição do fenômeno explicado na fundamentação teórica, onde cada superfície é exposta a uma temperatura diferente,

formando uma polarização de carga elétrica devido a diferença entre as propriedades dos blocos semicondutores. A resistência de contato entre as emendas elétricas promove uma oposição ao fluxo de corrente, promovendo uma variação na densidade de corrente elétrica ao longo do módulo. A consequência desta oposição é um efeito Peltier reverso, que concorre com a variação de temperatura que deu origem ao fluxo de corrente elétrica pelo efeito Seebeck. Este comportamento foi demonstrado graficamente pela análise experimental que trata o livro (ALENCAR; SOUTO, C., 2018).

3.11. Definição da espessura da malha

Para avaliar o impacto do tamanho da malha numérica, foram criadas três malhas com características distintas, conforme apresentado na Tabela 8. Os resultados obtidos revelaram um erro inferior a 5% em todas as malhas, levando à seleção da malha menos refinada. Essa escolha foi motivada pelo ganho significativo de desempenho na simulação de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

Tabela 8 – Teste de malha.

Sistema Geotérmico				
Parâmetro de medição	malha 1	malha 2	malha 3	Variação
Tamanho do elemento (mm)	0,03	0,05	0,1	2,3333%
Im da entrada do fluido (K)	303,083	303,107	303,095	0,0000%
Saída do fluido (K)	296,670	296,670	296,635	-0,0001%
Curva (K)	295,880	295,860	295,892	0,0000%
solo à esquerda do tubo (K)	296,883	296,619	296,754	-0,0004%
solo direita do tubo (K)	296,808	296,466	296,989	0,0006%
Quantidade de nós	5341740	3840651	3426549	-0,3585%
Quantidade de elementos	19999084	12163459	9990784	-0,5004%
Módulo Termelétrico				
Tamanho do elemento	0,01	0,001	0,0008	-0,9200%
Dens. corrente (A/m ²)	1768000,00	1498000,00	1476200,00	-0,1650%
Tensão (V)	0,08000	0,08000	0,08000	0,0000%
Corrente (A)	0,68196	0,67917	0,67978	-0,0032%
Quantidade de nós	5960	9332	22486	2,7728%
Quantidade de elementos	344	625	2149	-0,6394%
Núcleo				
Tamanho do elemento (mm)	0,01	0,001	0,0001	-0,9900%
Canto inferior lado quente (K)	299,190	312,321	312,321	0,0439%
Saída frio (K)	296,713	315,248	315,249	0,0625%
Canto superior lado quente (K)	298,929	313,883	313,895	0,0501%
Saída quente (K)	345,548	315,479	315,479	-0,0870%
Quantidade de nós	123261	271311	1905687	14,4606%

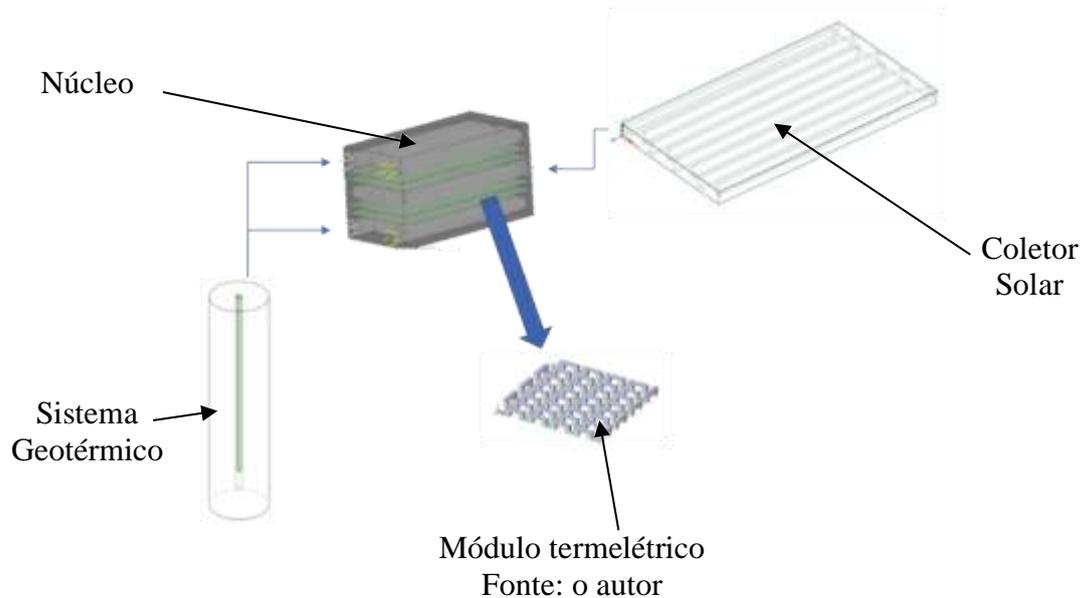
Quantidade de elementos	382252	734407	4822679	11,6165%
Coletor Solar				
Tamanho do elemento (mm)	0,05	0,01	0,005	-0,9000%
Entrada de fluido (K)	348,156	348,150	348,149	0,0000%
Meio da estrutura (K)	350,894	350,970	350,942	0,0001%
Saída de fluido (K)	353,343	353,346	353,343	0,0000%
Quantidade de nós	196449	1678706	7466451	37,0071%
Quantidade de elementos	464807	5584116	26954604	56,9910%

3.12. Visão geral da simulação

Devido ao esforço computacional, a simulação do sistema proposto foi dividida em quatro simulações distintas, sendo cada uma delas responsável por demonstrar separadamente o comportamento de cada fenômeno descrito aqui neste projeto.

Todas as simulações realizadas convergem para um funcionamento global, de modo que a relação entre elas está representada pela Figura 49. O sistema geotérmico possui temperaturas de entrada e saída coerentes com os valores dos blocos resfriadores do núcleo, conforme condições obtidas experimentalmente, com temperaturas de aproximadamente 30 °C e 23 °C, respectivamente. Da mesma forma, as temperaturas de entrada e saída do coletor Solar se comunicam com os valores de saída e entrada do bloco aquecedor do núcleo, com valores de aproximadamente 75 °C e 80 °C, respectivamente. O módulo termelétrico recebe em sua face fria a média de temperatura dos blocos Resfriadores do núcleo e em sua face quente a média de temperatura do bloco Aquecedor do núcleo.

Figura 49 – Interação conceitual entre as simulações.



Sendo assim, a saída do coletor Solar com 80 °C é entregue à entrada do bloco aquecedor. O bloco aquecedor extrai calor do fluido e o devolve a uma temperatura com valor que pode variar entre 70 e 77 °C (considerados 75 °C). Concomitantemente, a saída do sistema geotérmico possui temperatura de 23 °C, que é entregue aos blocos resfriadores. Estes blocos extraem calor do módulo termelétrico, devolvendo o fluido ao sistema geotérmico com valor de temperatura compreendido entre 25 e 30 °C (considerado 30 °C). Na simulação do módulo termelétrico, a face fria é configurada com o valor da temperatura obtido pela média dos valores de temperatura de entrada e saída dos blocos resfriadores do núcleo. A face quente do módulo é configurada com temperatura correspondente à média entre as temperaturas de entrada e saída do bloco aquecedor do núcleo. Estes valores foram 26,5 °C (média entre 23 °C e 30 °C) e 77,5 °C (média entre 75 °C e 80 °C), respectivamente.

3.13. Condições de contorno

Existem diversas formas de se obter aquecimento ou resfriamento de um fluido. Dentre tantas, esta pesquisa deu preferência a fomentar o uso de formas passivas provenientes de fontes naturais de energia térmica, capazes de fornecer uma diferença de temperatura relevante para uma análise experimental satisfatória.

Para auxiliar na escolha dos valores de temperatura utilizados durante o projeto, foi elaborada a Tabela 1, baseada na revisão bibliográfica, contendo um resumo das

temperaturas encontradas nos artigos científicos que tratam de fontes naturais de aquecimento e resfriamento, bem como as condições em que os valores foram obtidos.

É possível observar que, através de diferentes tecnologias, se pode considerar aplicações com temperaturas de aquecimento que variam de 80 °C até mais de 500 °C. Porém, a maioria dos dispositivos termoelétricos encontrados no mercado suportam temperaturas de até 300 °C. No caso de sistemas geotérmicos de resfriamento, os resultados encontrados nesta revisão bibliográfica apresentam temperaturas de no máximo 72,5 °C a serem resfriadas e temperaturas de no mínimo 16 °C após o resfriamento.

Sendo assim, para o desenvolvimento desta pesquisa, foram adotados valores que correspondem a sistemas cuja temperatura de aquecimento seja de até 80 °C e temperatura de resfriamento de pelo menos 20 °C. Tais valores correspondem a uma diferença de temperatura de 60 °C que é suficiente para a comprovação do funcionamento do modelo proposto neste trabalho.

3.14. Estudo de caso

Após a determinação das condições de contorno, se faz necessária a análise do comportamento do sistema em condições correspondentes a um dia comum, porém, como o sistema não possui um aparato real necessário para a análise empírica, foi considerada a emulação de situação prevista na literatura, com a utilização dos recursos já descritos até aqui, a fim de representar o desempenho do sistema o mais parecido possível com o que se espera da realidade.

Uma pesquisa de 2016 que avaliava modelos de concentrador Solar plano fez uma análise experimental empírica de um sistema de aquecimento Solar por coletor plano, em comparação à irradiação Solar durante um dia inteiro (GUPTA *et al.*, 2016). Com a análise em questão, o concentrador Solar proposto pelos autores atingiu valores acima de 50 °C de temperatura do fluido, sob concentração Solar de até 900 W/m². Porém, o que será considerado para esta pesquisa é o comportamento da temperatura ao longo do dia, conforme os resultados que serão apresentados no capítulo posterior.

Em posse destes resultados, executou-se uma análise experimental capaz de representar graficamente um comportamento semelhante à variação da temperatura do fluido ao longo de um dia inteiro. Porém, devido ao uso de reguladores de temperatura, o

experimento pôde ocorrer em um tempo resumido, com uma escala de 1h de experimento equivalente a 6 horas de relógio suficientes para a compreensão do fenômeno.

CAPÍTULO 4

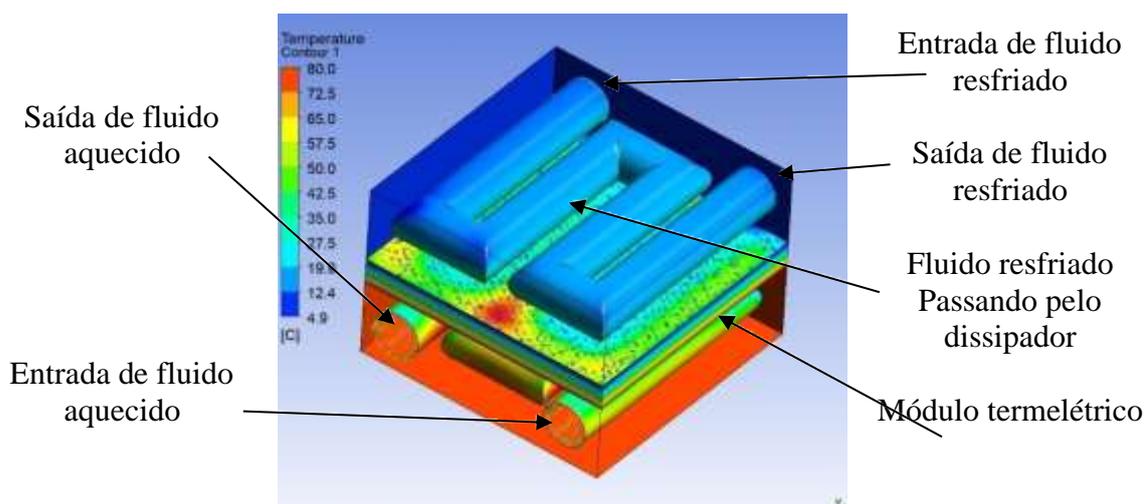
RESULTADOS

4.1. Simulação do modelo simplificado

A simulação do modelo simplificado descrita em 3.6 tem como finalidade apresentar o comportamento térmico dos blocos dissipadores mediante a passagem dos fluidos de resfriamento e de aquecimento, mesmo posicionados em uma distância mínima que é equivalente à espessura do módulo termelétrico.

Mediante as condições de contorno discriminadas anteriormente, a simulação realizada no Ansys® trouxe o comportamento da temperatura do fluido conforme Figura 50

Figura 50– Resultado de simulação do comportamento do fluido passando pela estrutura.



Fonte: o autor

Nesta figura é possível observar o ponto de *Entrada de fluido aquecido*, por onde se inicia a circulação do fluido que corresponde ao sistema de aquecimento por coletor Solar. Este fluido circula o interior do bloco e o deixa pela outra abertura *Saída de fluido aquecido*. Concomitantemente, o fluido resfriado circula pelo bloco resfriador desde a *Entrada de fluido resfriado* até a *saída de fluido resfriado*. Este funcionamento corresponde ao fluido oriundo do sistema de resfriamento geotérmico. Entre os blocos de aquecimento e

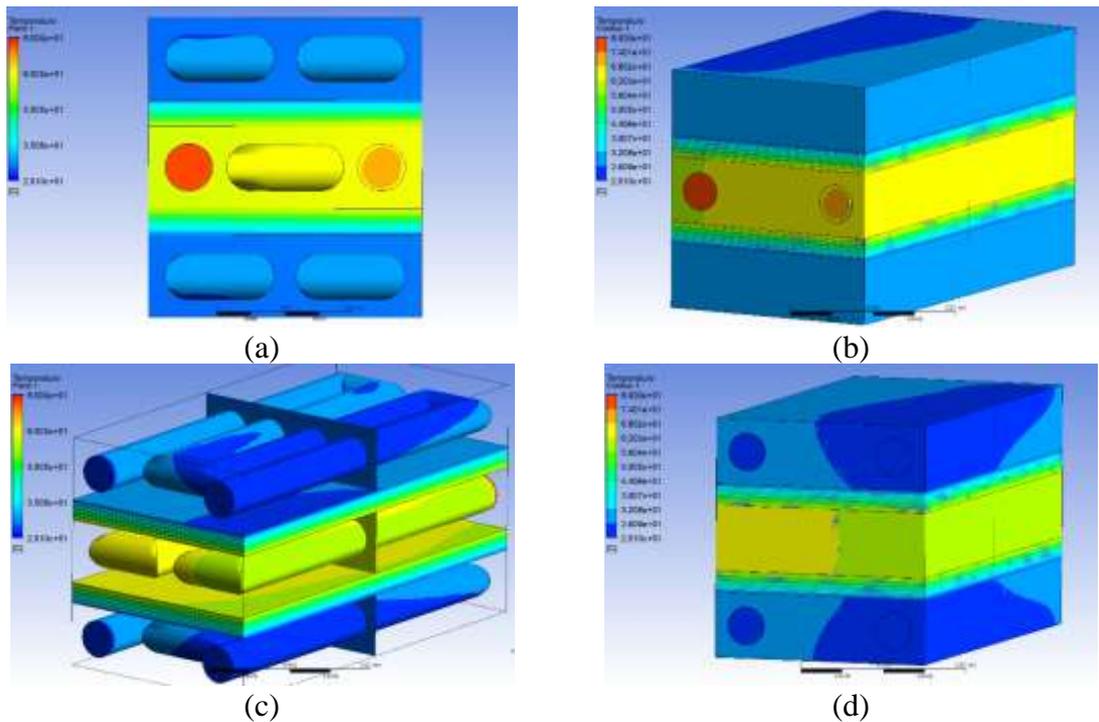
resfriamento, é possível observar uma variação brusca de cor que vai do azul com aproximadamente 12 °C até o vermelho com aproximadamente 77 °C, representando o fluxo de calor. O bloco que recebe este fluxo de calor corresponde ao módulo termelétrico.

Desta simulação é possível observar o comportamento da transferência de calor do fluido em cada etapa do circuito, desde o aquecimento proveniente da concentração Solar, sua passagem pelo sistema com a temperatura de 80 °C, conforme discriminada nas condições de contorno e a saída do bloco com temperatura um pouco inferior de aproximadamente 77 °C (variação da coloração vermelha). Da mesma forma, o fluido que entra pelo bloco de resfriamento, com a temperatura de 10 °C configurada nas condições de contorno, deixa o bloco com temperatura um pouco mais elevada de aproximadamente 12 °C (variação da coloração azul). Já nas superfícies do bloco correspondente ao módulo termelétrico posicionado entre os blocos dissipadores, é possível observar toda a paleta de cores do intervalo de temperatura, ou seja, temperatura variando desde 80 °C até 10 °C, o que representa um fluxo de calor coerente com a diferença de temperatura de aproximadamente 70 °C - que é a variável diretamente proporcional à tensão gerada - conforme a regra do coeficiente de Seebeck. (equação (2.1)).

4.2. Simulação do modelo principal

Após os resultados obtidos na análise do modelo reduzido, foi feito o modelo geométrico com características semelhantes ao modelo principal apresentado inicialmente na Figura 36. Na Figura 51 está uma sequência de imagens em diferentes ângulos do núcleo desta simulação. Usando as condições de contorno descritas anteriormente, onde o fluido de aquecimento entra com 80 °C e o fluido de resfriamento entra com 20 °C, o comportamento térmico do fluido aquecido pode ser observado com detalhe nos quadros “a” e “b”, onde há um círculo com coloração avermelhada, representando a entrada do fluido aquecido com temperatura de 80 °C. Com sua passagem pelo bloco, o fluido troca calor com a face quente do módulo termelétrico, deixando o sistema com uma temperatura um pouco menor de aproximadamente 77 °C, representada pelo círculo de cor laranja.

Figura 51– Modelo computacional do núcleo do modelo principal.



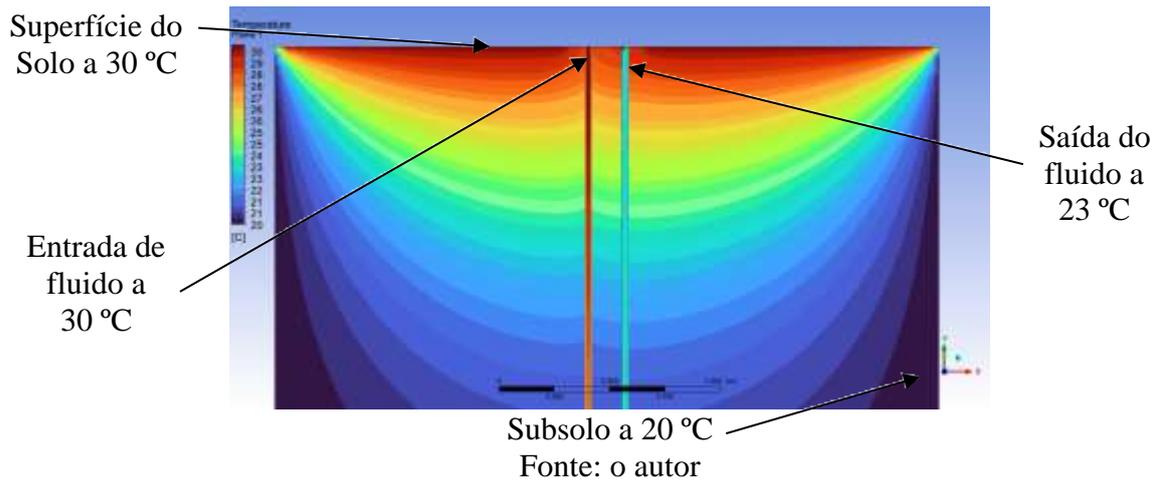
Fonte: o autor

No quadro “c” está sendo exibido o interior da estrutura, aparecendo o fluido que circula e os módulos termelétricos. No quadro “d” está o mesmo enquadramento, porém com a visualização do exterior da estrutura. A mudança de coloração em tonalidade azul representa a variação de temperatura, sendo o azul mais escuro a temperatura mais baixa do fluido, que corresponde ao valor de entrada a uma temperatura de 20 °C, e o azul mais claro a temperatura do dissipador após receber calor do módulo termelétrico, com temperatura de aproximadamente 23 °C.

4.3. Simulação do sistema geotérmico

O sistema geotérmico descrito na sessão 3.8 trouxe como resultado uma variação de temperatura que escoa gradativamente a partir da entrada de fluido no sistema até o final do Solo, acrescido da troca de calor do Solo com a superfície, correspondendo ao comportamento descrito nos artigos mencionados na revisão bibliográfica, onde a variação de temperatura do Solo cessa com profundidades superiores a 3 metros, mantendo-se constante a uma temperatura de aproximadamente 20 °C. O fluido que chega ao sistema com temperatura de 30 °C, o deixa com temperatura de 23,5 °C na simulação de estaca em “U” com 20 metros de profundidade.

Figura 52– Comportamento térmico do sistema geotérmico.

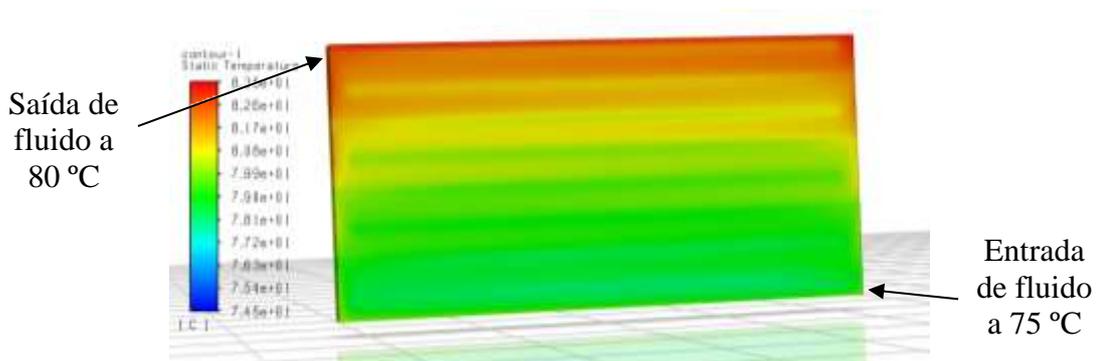


A Figura 52 representa o comportamento térmico da estaca geotérmica, com temperatura variando de 20 °C, em azul, até 30 °C, em vermelho. Na parte superior da figura se encontra a superfície do Solo em contato com o ar com temperatura de 30 °C. À medida que a profundidade vai aumentando, a temperatura vai se aproximando do valor constante do subsolo de 20 °C. Ao centro se encontra o tubo em forma de “U” com fluido de entrada a 30 °C e saída a 23,5 °C.

4.4. Simulação do Coletor Solar Plano

Com o modelo simplificado do coletor Solar plano descrito em 3.9, foi possível representar o processo de transformação de temperatura do fluido durante a exposição ao Sol. Para esta simulação específica, foi considerada a localização geográfica do LaSEA no interior da UFPB, com calendário Solar referente às 8h da manhã do dia 06 de junho. O painel possui as dimensões de 2 m x 4 m x 0,4 m.

Figura 53– Resultado da simulação do coletor Solar plano.



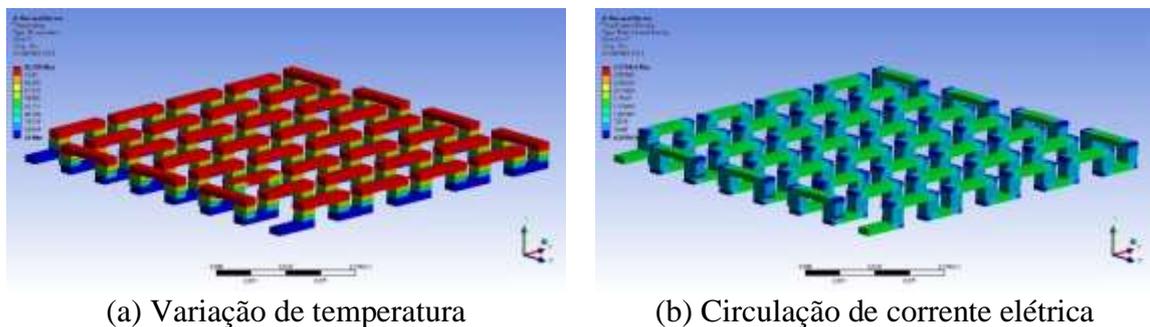
Fonte: o autor.

Na Figura 53 é possível observar a mudança de coloração do fluido, correspondente a uma variação de temperatura de 74,5 °C até 83,5 °C. Na simulação, a superfície de vidro permite que 90 % da luz Solar entre no reservatório de alumínio, que por sua vez absorve a maior parte desta luz, convertendo sua energia em calor. O calor acumulado por irradiação é então transferido para a água por condução, elevando sua temperatura. Ao passo que a temperatura da água vai aumentando, sua densidade vai diminuindo, fazendo com que a água mais quente se dirija até a parte mais elevada do módulo, onde se encontra a saída. Este fenômeno é equivalente à mudança de coloração que mostra a figura, onde a coloração mais avermelhada representa temperaturas mais elevadas e coloração azul a temperatura mais baixa.

4.5. Simulação do Módulo Termelétrico

Para a compreensão do funcionamento do módulo termelétrico, foi elaborada uma simulação capaz de representar a densidade de corrente elétrica, mediante a variação da diferença de temperatura entre suas faces. A Figura 54 mostra a variação de temperatura e a consequente densidade de corrente elétrica no modelo.

Figura 54– Modelo computacional do módulo termelétrico. Variação de temperatura (a). Densidade de corrente elétrica (b)



Fonte: o autor.

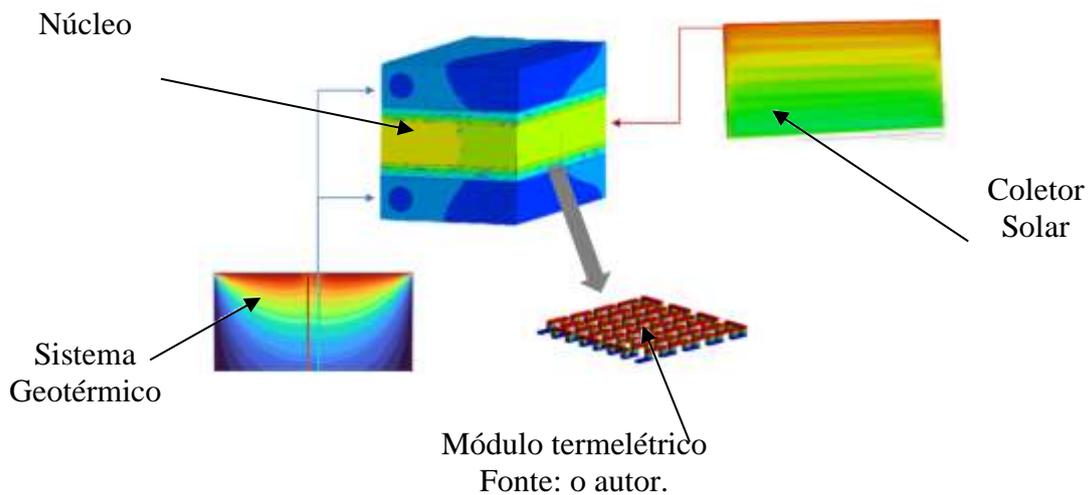
A simulação consiste na confecção de junções bimetálicas semelhante ao encontrado no modelo real utilizado na análise experimental. A densidade de corrente atravessando as conexões em (b) é consequência da variação de temperatura representada em (a) e ambos os fenômenos ocorrem concomitantemente.

Para este modelo, com temperatura variando entre 20 °C e 80 °C, a corrente elétrica produzida foi de aproximadamente 0,679 A, com tensão de 0,08V.

4.6. Visão geral das simulações

Assim como descrito em 3.12, as simulações foram realizadas separadamente devido ao esforço computacional, porém com a finalidade de convergirem para o modelo principal, objeto deste trabalho. A Figura 55 representa a relação entre as simulações, assim como o modelo principal descrito em 3.2.

Figura 55 – Interação conceitual entre as simulações.



Nesta relação as simulações se conectam de tal maneira que o coletor Solar se conecta com o dissipador central do núcleo, onde circula o fluido aquecido. O fluido entra no coletor Solar com temperatura de aproximadamente 75 °C, é aquecido pelo Sol e sai do coletor com temperatura de 82 °C indo para o bloco dissipador central do núcleo. As perdas referentes ao transporte do fluido fazem com que o fluido chegue ao núcleo com temperatura de 80 °C, onde entrega calor aos módulos termelétricos, reduzindo a temperatura para 77 °C. Concomitantemente, o fluido resfriado entra no resfriador geotérmico com temperatura de aproximadamente 25 °C, o subsolo com temperatura mais baixa extrai calor do fluido, reduzindo sua temperatura para 20 °C. O fluido resfriado é bombeado para os dissipadores resfriadores do núcleo, onde recebe calor do módulo termelétrico enquanto circula no interior do dissipador, deixando o sistema com temperatura de aproximadamente 23 °C. Os módulos termelétricos acomodados entre os dissipadores ficam, então, expostos às temperaturas médias dos blocos dissipadores, com aproximadamente 80 °C na face quente

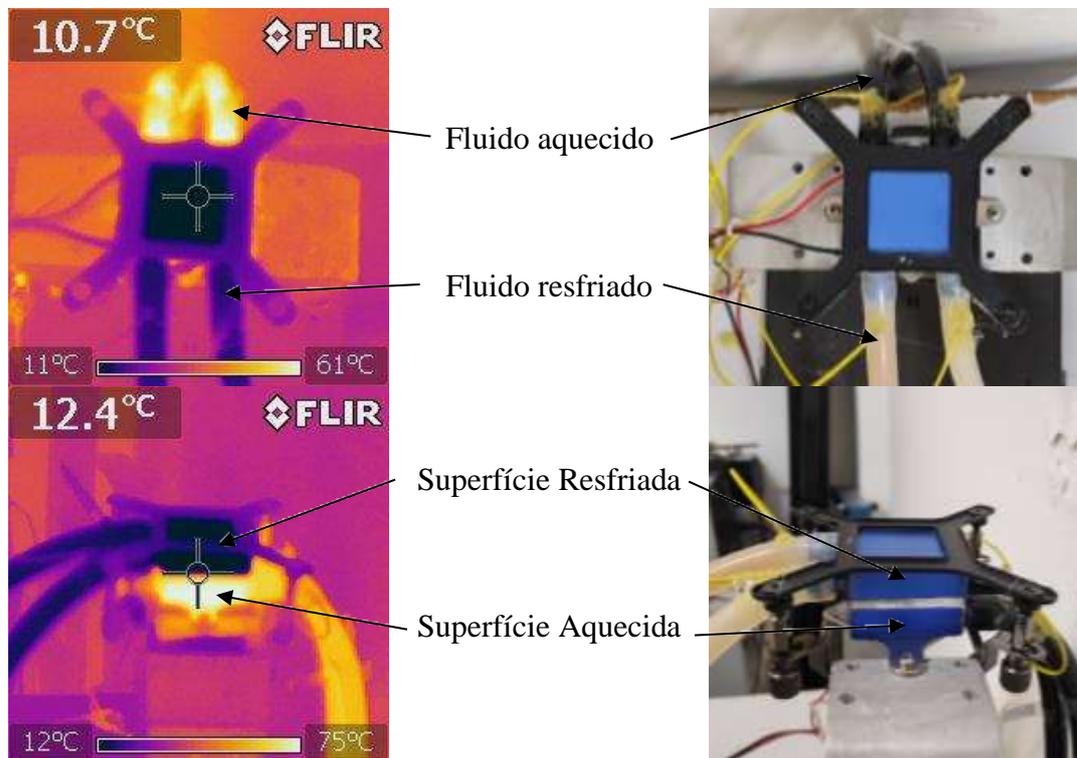
que está em contato com o dissipador central, e aproximadamente 20 °C na face fria que está em contato com os dissipadores resfriadores.

4.7. Resultados experimentais do modelo simplificado

O resultado da circulação do fluido foi registrado com uma câmera térmica e sensores de temperatura posicionados nas mangueiras de entrada e saída do fluido.

As imagens térmicas comparadas com fotos comuns da estrutura sob análise estão apresentadas na Figura 56. Por estas imagens termográficas é possível perceber a variação de temperatura conforme a variação de cor, onde a parte mais azul escura a região com menor temperatura (11 °C) e a parte mais amarelo claro com a temperatura mais elevada (61 °C).

Figura 56– registro termográfico (esquerda) e fotografia comum correspondente (direita).



Fonte: o autor.

As imagens obtidas na Figura 56 representam um comportamento semelhante à Figura 50, validando o modelo proposto em sua versão reduzida, conforme o fluxograma Figura 40.

As temperaturas dos terminais de entrada e saída de cada bloco dissipador foram capturadas em tempo real através do sistema de aquisição descrito no capítulo anterior e

estão registradas na Figura 57, onde constam sete gráficos, conforme a legenda. O gráfico de cor azul escura representa o comportamento térmico da média de temperatura do fluido resfriado. Os gráficos de cor azul clara representam o comportamento da temperatura de entrada e saída do fluido no bloco resfriador. O gráfico de cor vermelha escura representa o comportamento térmico da média da temperatura do fluido aquecido. Os gráficos de cor vermelha clara correspondem aos valores de temperatura de entrada e saída do fluido no bloco aquecedor. O gráfico de cor verde corresponde à diferença de temperatura dos blocos dissipadores, considerando o valor médio das temperaturas de entrada e saída de cada bloco, conforme a equação (4.1).

$$\Delta T = \frac{T_{QE} + T_{QS}}{2} - \frac{T_{FE} + T_{FS}}{2} \quad (4.1)$$

Onde

ΔT = Diferença de Temperatura

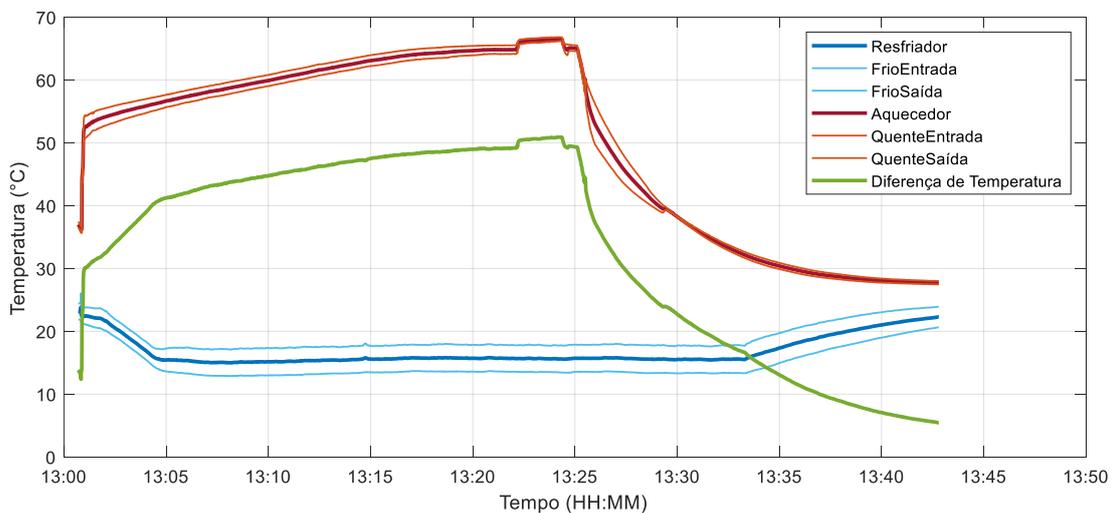
T_{QE} = QuenteEntrada

T_{QS} = QuenteSaída

T_{FE} = FrioEntrada

T_{FS} = FrioSaída

Figura 57– Temperaturas nos terminais de circulação de fluido e a diferença de temperatura.

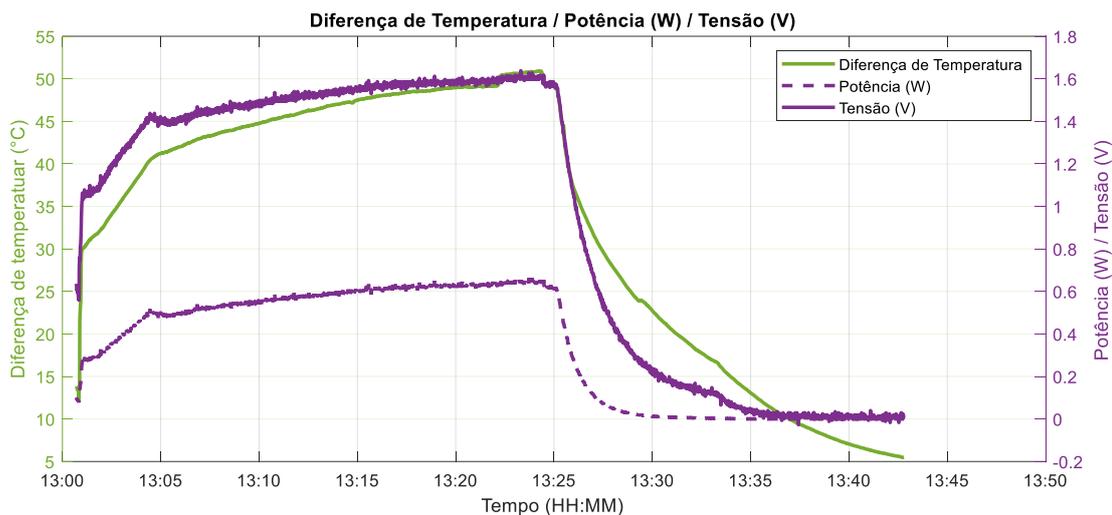


Fonte: o autor.

Na aquisição, o sistema partiu da condição de repouso, com temperatura estabilizada em torno de 25 °C, com o ambiente usando aparelho de ar condicionado. Por volta das 13h00 foram acionados os recirculadores, dando início a alteração da temperatura dos fluidos, de forma que o fluido resfriado saiu de 25 °C para 13,5 °C na entrada do bloco resfriador e deixou o bloco com temperatura de aproximadamente 17,8 °C. No caso do fluido aquecedor, seguiu para uma temperatura de aproximadamente 66,6 °C na entrada do bloco aquecedor e o deixou com temperatura de aproximadamente 65,9 °C. O gráfico da diferença de temperatura saiu de quase zero até um pico de 50 °C. Às 13h25 o recirculador aquecedor foi desligado, promovendo uma queda brusca na temperatura do fluido aquecedor, reduzindo rapidamente sua temperatura para aproximadamente 28 °C. Às 13h34 foi desligado o recirculador resfriador, fazendo com que a temperatura do fluido resfriado subisse rapidamente até a temperatura do ambiente. Ao passo que as temperaturas dos fluidos retornavam ao equilíbrio térmico à temperatura ambiente, a diferença de temperatura foi sendo reduzida.

Ao mesmo tempo que as temperaturas estavam sendo armazenadas no experimento anterior, também foram armazenados os gráficos de tensão e potência elétricas, colhidos dos terminais do módulo termelétrico, posicionado entre os blocos dissipadores. Inicialmente, às 13h00, a tensão e a potência se encontravam próximas a zero, assim como a diferença de temperatura. Quando os recirculadores foram acionados, o valor da tensão subiu rapidamente para 1 Volt e continuou a subir até um pico de 1,6 Volts. Concomitantemente, a potência elétrica saiu também de próximo a zero para o valor máximo de 642 mW. Ao desligar os recirculadores, ambos os valores retornaram ao zero.

Figura 58 – Tensão e Potência elétricas nos terminais do dispositivo termelétrico em relação à Diferença de temperatura entre as faces.



Fonte: o autor.

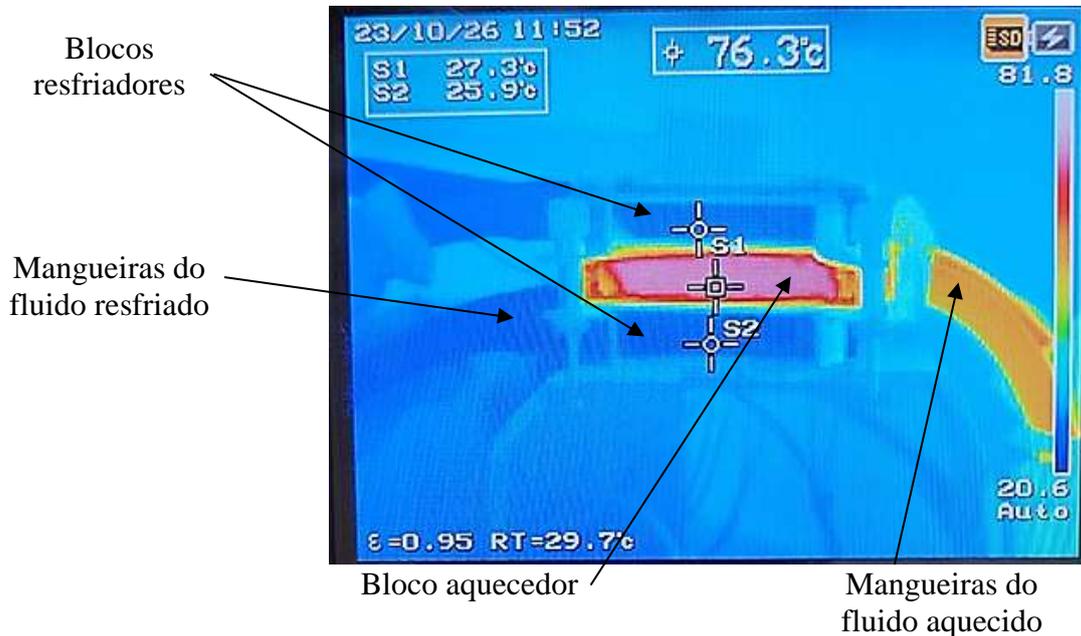
Já na Figura 58, a mesma diferença de temperatura entre os blocos dissipadores da Figura 57, cujos valores se encontram à esquerda do gráfico, é sobreposta aos gráficos de tensão e potência elétrica produzidos pelo gerador termelétrico (com valores à direita do gráfico). O formato do gráfico da diferença de temperatura se assemelha ao formato do gráfico de tensão elétrica e também da potência elétrica, sendo que a diferença de temperatura se relaciona com a tensão elétrica conforme a equação de Seebeck (2.1) e com a potência elétrica conforme a equação da potência termelétrica descrita neste trabalho (2.6).

4.8. Resultados experimentais do modelo principal

Após a análise do comportamento térmico do modelo proposto inicialmente na figura Figura 36 mediante a simulação descrita anteriormente, foi elaborada a bancada de análise experimental, descrita na Figura 37. O comportamento térmico dessa estrutura foi registrado através de câmera termográfica, conforme Figura 59, tornando possível identificar o fluxo de calor saindo do bloco aquecedor ao centro em direção aos blocos resfriadores nas extremidades superior e inferior. Em relação à Figura 37, a mangueira que está com coloração vermelha equivale à mangueira preta do sistema de aquecimento. Já a mangueira de resfriamento que possui coloração branca, está representada termograficamente pela cor azul escuro. Entre os blocos estão depositados os módulos termelétricos, cuja representação termográfica é praticamente suprimida pelo excesso de cores azul e vermelha. Neste registro, a coloração vermelha equivale a temperatura de 81,8 °C e a coloração azul equivale a 20,6

°C. No equipamento estão configurados pontos de análise térmica, tornando possível realizar a leitura da temperatura de cada bloco dissipador separadamente. Neste caso, os blocos resfriadores estão com temperatura de aproximadamente 26 °C e o bloco aquecedor com temperatura de aproximadamente 76,3 °C.

Figura 59– Análise termográfica do sistema em pleno funcionamento (foto tirada da tela da câmera termográfica).

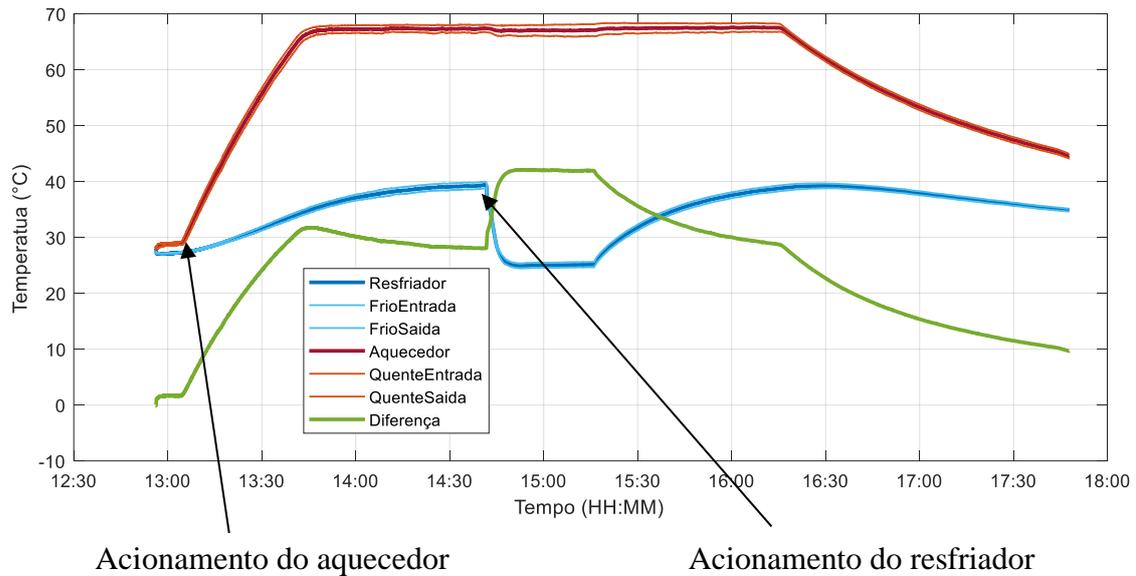


4.9. Aquisição de dados

Além da análise termográfica, o sistema teve seu desempenho monitorado em tempo real. Para isso foi feita a montagem de uma interface de aquisição de dados, a fim de analisar as informações do sistema durante a execução do experimento.

A resposta do sistema foi armazenada em um arquivo cujos dados foram representados em forma de gráficos na Figura 60 e na Figura 61. Em ambos os gráficos, está registrado o comportamento do sistema durante o período de 13h00 até 18h00, conforme o horário em que ocorreu o experimento.

Figura 60– Comportamento térmico dos fluidos passando pela estrutura.



Fonte: o autor.

Na Figura 60, estão representados os comportamentos térmicos dos fluidos de resfriamento e aquecimento. Na cor verde está o gráfico da diferença entre as temperaturas médias dos blocos dissipadores. Em vermelho escuro está o gráfico da média temperatura do bloco aquecedor, seguida pelas linhas finas em vermelho claro, que representam os valores de entrada e saída do fluido no bloco aquecedor. Em azul estão os gráficos de temperatura do fluido nos blocos resfriadores, sendo azul escuro a média das temperaturas e em azul claro mais fino as temperaturas de entrada e saída. É possível observar que a temperatura do fluido não se altera muito enquanto atravessa o sistema nem no caso do aquecimento nem do resfriamento.

O experimento partiu inicialmente por volta das 13 horas com ambos os fluidos à temperatura ambiente de 28 °C sendo bombeados através do sistema. Após cerca de 15 minutos, foi acionado o sistema de aquecimento com uma temperatura de 80 °C, emulando a chegada do Sol ao sistema, elevando rapidamente a temperatura do bloco aquecedor, onde às 13h45 o fluido já se encontrava na temperatura máxima do experimento, com valor de 67,3 °C, permanecendo sem grandes alterações até o desligamento do aquecedor que ocorreu às 16h25.

No caso do fluido resfriado, desde o instante inicial até as 14h40 circulava um fluido em circuito fechado entre o bloco resfriador e o reservatório submerso, porém sem o

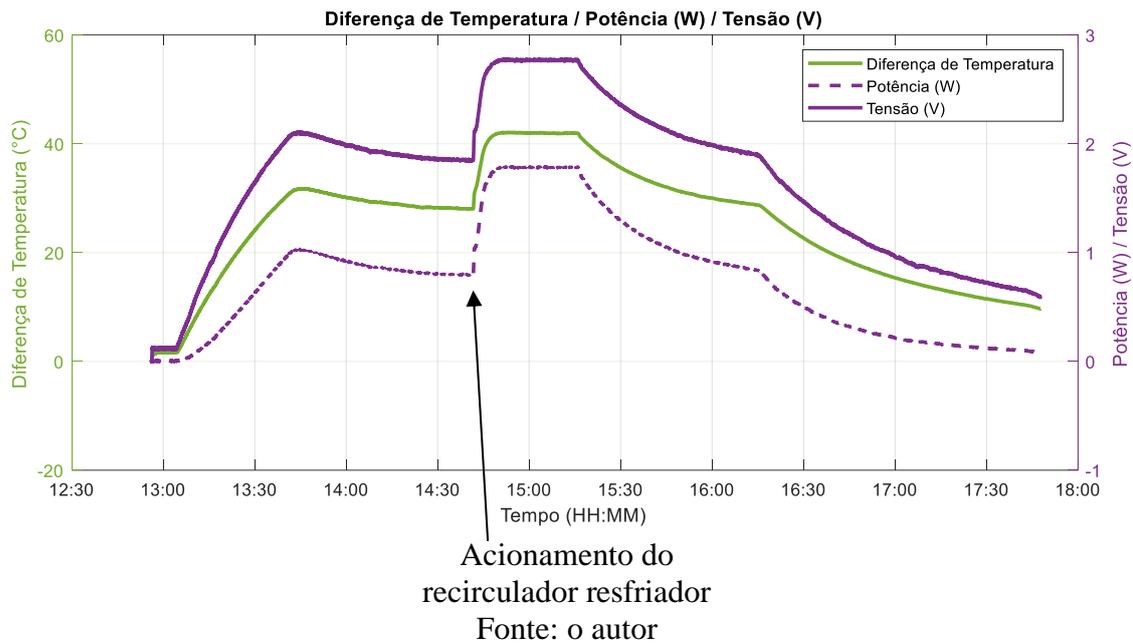
acionamento do recirculador resfriador. Esta situação representa o sistema de resfriamento por radiador sem estar submerso em um sistema geotérmico. A partir das 14h40 é acionado o recirculador controlado a fim de emular a submersão do trocador de calor a uma temperatura constante de 20 °C, assim como previsto na literatura sobre resfriamento geotérmico para profundidades a partir de 3 metros. Em apenas 10 minutos o sistema se estabilizou a uma temperatura de aproximadamente 25 °C, permanecendo assim até o desligamento do sistema de resfriamento. Às 15h16 o sistema de resfriamento foi desligado, provocando um aumento da temperatura que se estabilizou em aproximadamente 39 °C, após 1h de funcionamento.

Desde o momento que o resfriador foi acionado é possível observar um distanciamento entre os valores de temperatura de entrada e saída do fluido aquecedor, porém reduzindo em apenas 0,5 °C a média de temperatura do fluido, sendo a máxima na entrada do sistema de 67,93 °C e a mínima de 66,15 °C. No caso do fluido resfriado, as temperaturas mínimo e máximo foram de 24,5 °C e 25,4 °C, respectivamente. Às 16h16, após constatar a estabilização da temperatura do fluido aquecido, foi desligado o sistema de aquecimento, voltando à condição que o sistema estava no começo do experimento, ou seja, com os fluidos circulando sem acréscimo ou retirada de calor por conta dos aparelhos recirculadores. Após 1h30 nesta condição, os fluidos de aquecimento e resfriamento estavam com temperaturas de 45 °C e 35 °C, respectivamente. O sistema foi desligado completamente às 17h50, finalizando o experimento.

Há uma diferença de temperatura entre os recirculadores e o núcleo, devido às perdas ao longo das mangueiras. No caso do fluido aquecido, o recirculador foi programado para uma temperatura de 80 °C e a temperatura do fluido no núcleo foi de aproximadamente 67 °C. No caso do fluido aquecido, o recirculador resfriador foi configurado para uma temperatura de 20 °C e o fluido circulou o núcleo do sistema com uma temperatura de aproximadamente 25 °C.

Já no caso da Figura 61, estão representados os gráficos da tensão e da potência elétricas na cor lilás, com valores à direita, em comparação com o mesmo gráfico de diferença de temperatura da Figura 60 na cor verde, com valores à esquerda.

Figura 61– Gráficos da tensão e da potência elétricas.

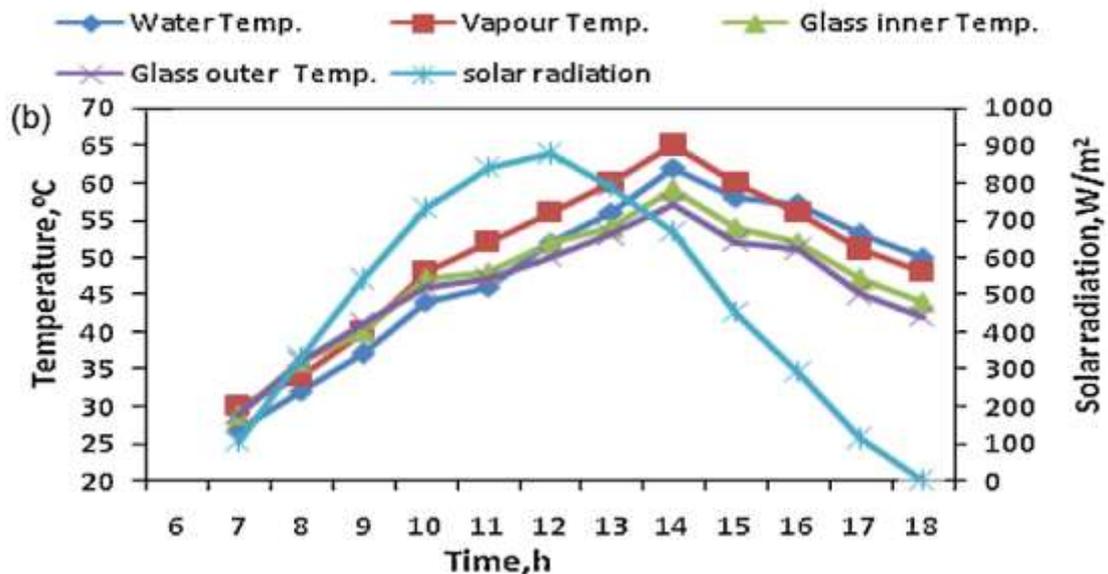


As informações representadas na Figura 61 foram capturadas em concomitância com as informações da Figura 60. Sendo assim, no instante inicial do experimento, enquanto a diferença de temperatura estava em 0 °C, os valores de tensão e potência também eram zero. Desde o acionamento do recirculador aquecedor, até a temperatura do fluido aquecido se estabilizar em aproximadamente 67 °C às 13h40, a diferença de temperatura subiu de zero até 31 °C. Concomitantemente e com comportamento semelhante, a tensão elétrica saiu de zero até 2 Volts. A potência elétrica, seguindo o mesmo comportamento, saiu de zero para 1 watt. Estes três valores tiveram uma redução conforme o fluido resfriado acumulava calor, sendo que no instante 14h40 em que foi acionado o resfriador, a diferença de temperatura havia caído para 28 °C, a tensão elétrica para 1,85 Volts e a potência elétrica para 0,8 Watts. A partir daí, com o fluido resfriado seguindo para uma temperatura de 25 °C, os três valores deram um salto para o valor máximo deste experimento, onde a diferença de temperatura chegou a 42 °C, a tensão a 2,77 Volts e a potência elétrica chegou a quase 1,8 watts. A partir das 15h16 horas, quando o sistema de resfriamento foi desligado, os valores de diferença de temperatura, tensão e potência foram reduzindo gradativamente, chegando a uma potência mínima de 0,08 Watts às 17h50, quando se encerrou o experimento.

4.10. Estudo de caso

Tendo em vista que o sistema deve obedecer a condições determinadas pela natureza, este tópico apresenta o que se pode esperar do sistema proposto em um dia comum de Sol. A Figura 62 é mostrado o comportamento térmico de um sistema coletor Solar plano em comparação com a radiação Solar ao longo do dia (GUPTA *et al.*, 2016). O comportamento esperado de um sistema de aquecimento deste tipo é de tal forma que o sistema demora a acumular calor após a elevação do índice de radiação Solar, porém armazena este calor por horas após a redução do índice de radiação Solar, podendo se estender até algumas horas durante a noite, como ocorre nas grandes usinas heliotérmicas.

Figura 62– Comportamento térmico de coletor Solar plano convencional em relação à radiação Solar.

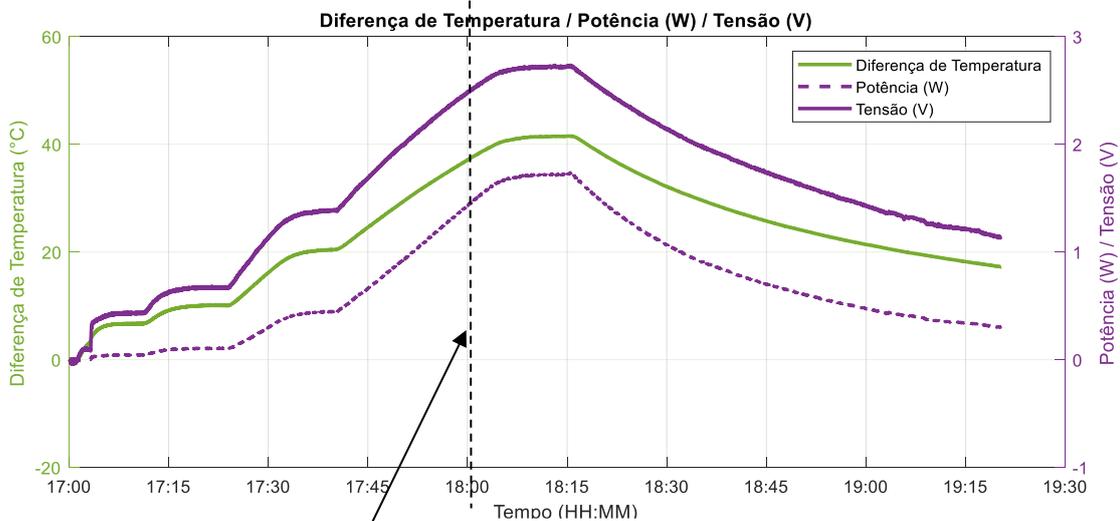
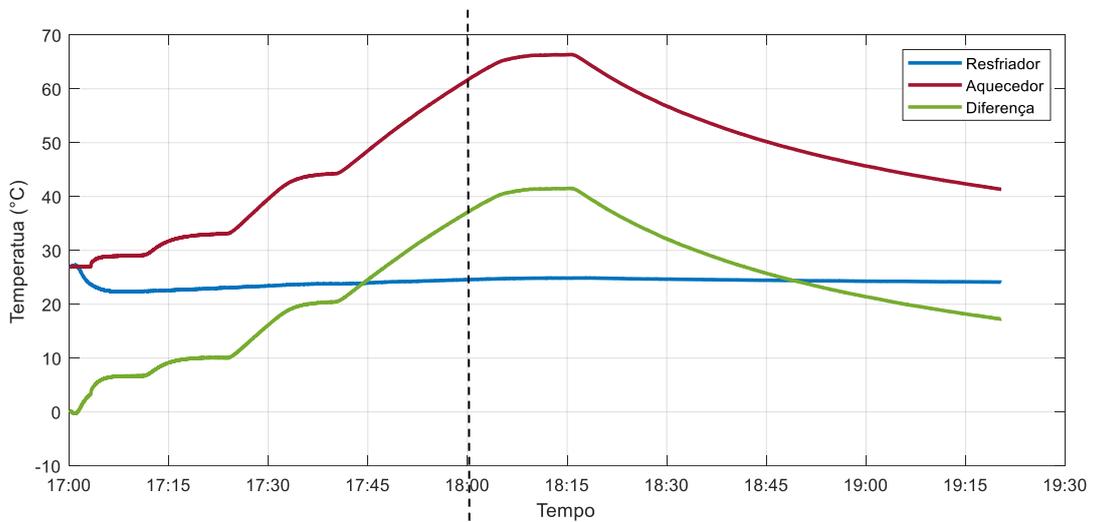


Fonte: (GUPTA *et al.*, 2016)

Para exemplificar esta referida situação, foi emulada uma situação semelhante a um dia comum, considerando as informações acumuladas até aqui sobre o comportamento do sistema. Na Figura 63 é representada uma situação semelhante ao que ocorre na Figura 62, de forma que o avançar das 12 horas de Sol (6h às 18h) foi resumido a 2 horas de simulação (17h às 19h). Na figura a seguir, a linha azul representa o comportamento térmico do fluido resfriado que, conforme situação hipotética, se encontra enterrado a partir de 3 metros de profundidade, onde a temperatura permanece constante ao longo do ano inteiro, neste caso, com temperatura de aproximadamente 20 °C, condição esta emulada pelo recirculador resfriador e pelo reservatório de água fria (Figura 39). Durante os momentos de maior

temperatura do aquecedor, o fluido resfriado tem uma leve alteração na sua temperatura média, indicando um esforço maior do sistema de resfriamento, porém com valores insignificantes. Já a linha de cor vermelha representa a temperatura no fluido aquecido por coletor Solar, que parte da temperatura ambiente e passa a acumular calor ao longo do dia devido a suposta incidência de radiação Solar. Na situação analisada, o valor máximo de temperatura do fluido ocorre equivalentemente após a hora mais radiante do dia, que seria na metade do experimento. Em seguida, o Sol declina em direção ao horizonte, porém o calor armazenado no sistema atrasa a redução da temperatura, de forma que o sistema permanece aquecido mesmo com a ausência do Sol.

Figura 63– Análise gráfica do comportamento do sistema em condições semelhantes a um dia típico.



Equivalente ao horário de 12:00

Fonte: o autor

O comportamento da diferença de temperatura obedece a esta variação ao longo do dia influenciando diretamente na geração de energia elétrica, de forma que o momento de maior quantidade de energia produzida coincide com o momento de maior acúmulo de calor logo após o pico de radiação Solar.

4.11. Comparação entre simulação e análise experimental

Os valores obtidos nas simulações do modelo principal foram comparados com os valores encontrados na análise experimental conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Comparação de valores da simulação e da análise experimental.

Grandeza	Simulação	Experimental	Erro (%)
Sistema de resfriamento (°C)			
Temperatura do subsolo	20,00	20,00	0
Temperatura de entrada do fluido no subsolo	30,00	27,30	-9
Temperatura de saída do fluido no subsolo	23,00	25,90	12,61
Temperatura de entrada do bloco resfriador	20,00	25,90	29,50
Temperatura de saída do bloco resfriador	23,00	27,30	18,70
Sistema de aquecimento (°C)			
Temperatura de entrada do fluido no coletor Solar	75,00	76,30	1,73
Temperatura de saída do fluido no coletor Solar	82,00	80,00	-2,44
Temperatura de entrada do bloco aquecedor	80,00	67,90	-15,13
Temperatura de saída do bloco aquecedor	77,00	66,20	-14,03
Diferença de temperatura no módulo termelétrico	60,00	42,00	-30,00
Grandezas elétricas			
Tensão máxima sobre a carga (V)	3,20	2,77	-13,44
Potência elétrica fornecida (W)	2,12	1,80	-15,09
Corrente elétrica (A)	0,67	0,65	-2,99
Média			-3,04

A maior divergência de valores encontrada foi nas temperaturas do bloco aquecedor, devido as perdas de calor no transporte do fluido do recirculador aquecedor até o núcleo. A simulação do módulo termelétrico considerou um único módulo de 40 mm x 40 mm, enquanto a análise experimental ocorreu com 4 módulos associados. Sendo assim, os valores de tensão e potência elétricas contidos na tabela referentes à simulação equivalem a 4 módulos.

Considerando a simulação como uma condição ideal, o erro foi calculado em relação à coluna de resultados de simulação.

4.12. Desempenho do sistema

O núcleo do modelo principal apresentado neste projeto, é composto por quatro módulos termelétricos de dimensões 40 mm x 40 mm, totalizando uma área de 0,0064 m², cuja combinação por associação elétrica mista proporcionou uma potência de 1,8 Watts nas condições deste experimento. Tais condições consistem em uma fonte de calor capaz de fornecer fluido de 80 °C a uma vazão de 2 L/min e um reservatório de resfriamento com temperatura constante de 20 °C trocando calor com um radiador com fluido bombeado a 2 L/min circulando pelo núcleo do sistema, proporcionando uma diferença de temperatura máxima de 42 °C entre as faces dos dispositivos termelétricos, onde a temperatura máxima do núcleo foi de aproximadamente 67 °C e a mínima de 25 °C. Para estas condições, o sistema proposto nesta pesquisa apresentou uma densidade de 281,25 W/m².

Este desempenho não é a melhor condição que este modelo pode alcançar, tendo em vista que existem módulos termelétricos mais eficientes e que suportam temperaturas mais elevadas, permitindo a utilização de outras tecnologias de aquecimento conforme consta na Tabela 1, aumentando a diferença de temperatura que é diretamente proporcional à potência produzida, conforme Equação (2.6).

Ainda assim, o modelo proposto nesta pesquisa foi comparado aos modelos mencionados na revisão bibliográfica na Tabela 2 e apresentou um resultado coerente com os demais, no que diz respeito à capacidade de geração de energia elétrica em relação à diferença de temperatura aplicada.

Tabela 10 - Resumo das capacidades de geração termelétrica encontradas na revisão bibliográfica em comparação com o trabalho atual.

Autor	Condição	Temperatura (°C)			Potência elétrica gerada	
		Mín	Máx	Dif.	W/unid	W/m ²
(LV <i>et al.</i> , 2018)	Aquecimento por combustão a gás. Resfriamento por água.	45,5	153,5	108	1,73	269,5
(LI, G. <i>et al.</i> , 2019)	20 módulos termelétricos Bi ² Te ³ . Aquecimento à combustão. Resfriamento à água	-	139	119	1,88	293,44
(ALGARNI; IRSHAD, 2023)	O coletor possui área de aproximadamente 2,6 m ²	-	59,2	28	1,82	284,38
Este trabalho	Aquecimento Solar e resfriamento geotérmico	25	67	42	1,8	281,25

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um gerador de energia elétrica composto por aquecedor Solar, resfriamento geotérmico e conversão termelétrica direta. O protótipo foi submetido a condições de contorno correspondentes às situações encontradas na revisão bibliográfica. Tais condições consistem na circulação de fluido aquecido a 80 °C conforme sistema de coletor Solar plano que passa pela superfície aquecida do núcleo do sistema, em concomitância com a circulação de um fluido resfriado por um banho térmico de 20 °C correspondente a um sistema geotérmico de troca de calor.

A diferença de temperatura entre os blocos atingiu, nestas condições, um valor de aproximadamente 42 °C. Tal condição fez com que o módulo termelétrico gerasse uma potência elétrica de aproximadamente 1,8 Watts com uma tensão de aproximadamente 2 Volts. Esta potência foi entregue a uma carga resistiva de 4,3 Ω . Como foram utilizados quatro módulos termelétricos de 40 mm x 40 mm associados para geração de energia elétrica, esta potência corresponde a uma densidade de 281,25 W/m².

Para obtenção destes resultados foi utilizada uma bancada experimental capaz de reproduzir as condições de contorno encontradas na literatura de forma que o núcleo do modelo proposto pudesse ter seu desempenho analisado minuciosamente, através de leitura em tempo real de seu comportamento térmico e elétrico, bem como uma análise termográfica para constatação da dispersão térmica do sistema, em resposta às condições emuladas.

Além da análise experimental, foram elaborados modelos computacionais capazes de simular cada parte do sistema, corroborando com a compreensão dos fenômenos, bem como avaliando formatos e dimensões diferentes a fim de validar o modelo teórico matemático sugerido para atender as demandas do modelo proposto. Os resultados das simulações foram compatíveis com os resultados experimentais, tornando possível a replicação da pesquisa e um possível escalonamento do sistema, a fim de atender demandas específicas de futuros projetos.

A pesquisa trouxe contribuição científica relevante em consideração ao conteúdo encontrado na literatura, tendo em vista que associa três fenômenos distintos que são naturais e renováveis, com grande potencial de produção nacional (Brasil) e desempenho razoável em comparação a outras tecnologias.

A tecnologia de termoeletricidade associada a aquecimento Solar e resfriamento geotérmico possui grande potencial de cooperação com as metas da COP26 (Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas) quanto em seu Artigo 6º trata do “Mercado regulado de carbono” que prevê a redução de emissão de dióxido de carbono em 45% em relação ao ano de 2010. Esse potencial advém da capacidade de produção de energia limpa com baixa emissão de carbono, além de ser capaz de extrair eletricidade a partir de energia térmica desperdiçada, incrementando a eficiência de sistemas já existentes. (“COP26: confira as principais decisões do Pacto Climático de Glasgow”, [s.d.]

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Construir um exemplar do modelo proposto, contendo um coletor Solar plano e um resfriador geotérmico, bem como analisar sua capacidade máxima de geração de energia elétrica ou mesmo de energia térmica associada, a fim de determinar a eficiência do sistema, seu custo de implementação, manutenção e durabilidade;
- Desenvolver um modelo computacional completo capaz de auxiliar no dimensionamento de projetos;
- Desenvolver um modelo matemático genérico capaz de relacionar variáveis de projetos e desempenho dos recursos naturais para a determinação da capacidade de geração de um projeto específico;
- Analisar o desempenho e sustentabilidade deste modelo de gerador quando associado a fontes de calor não naturais ou residuais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDO, A.; AHMED, M.; OOKAWARA, S. Efficient Operation of Hybrid Photovoltaic- Thermoelectric System Combined With Micro-. **16th International Conference on Clean Energy (ICCE-2018)**, 2018. n. May, p. 9–11.

ABED, F. M. *et al.* Modelling and experimental performance investigation of a transpired solar collector and underground heat exchanger assisted hybrid evaporative cooling system. **Journal of Building Engineering**, 1 dez. 2021. v. 44, p. 102620.

ACUÑA, A. *et al.* Impact d'un échangeur de chaleur géothermique vertical sur la fraction solaire d'un système de refroidissement solaire. **International Journal of Refrigeration**, 2017. v. 76, p. 63–72. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.02.007>>.

AFONSO, J. U. B. **Gerador Termoelétrico para Escape de Automóvel com Controlo de Temperatura**. [S.l.]: Universidade do Minho, 2014.

AL-NIMR, M. A.; DAWAHDEH, A. I.; ALI, H. A. Power generation by integrating a thermally regenerative electrochemical cycle (TREC) with a solar pond and underground heat exchanger. **Renewable Energy**, 1 abr. 2022. v. 189, p. 663–675. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148122003391>>. Acesso em: 26 abr. 2023.

ALBARGHOOTH, A.; RAMIAR, A.; RAMYAR, R. Earth-to-Air Heat Exchanger for Cooling Applications in a Hot and Dry Climate: Numerical and Experimental Study. **International Journal of Engineering**, 2023. v. 36, n. 01, p. 78–89.

ALENCAR, H.; SOUTO, C. **Termeletricidade - geração direta Uma análise experimental automatizada**. Softcover ed. João Pessoa, Pb: [s.n.], 2018.

ALGARNI, S.; IRSHAD, K. Performance evaluation of a hybrid thermoelectric generator and flat plate solar collector system in a semi-arid climate. **Case Studies in Thermal Engineering**, 1 abr. 2023. v. 44, p. 102842.

ALMEIDA, C. H. A.; SOUTO, C. Da R.; MOREIRA, G. A. A. GERADOR TERMELETRICO EM ESTADO SÓLIDO COM AQUECIMENTO SOLAR E RESFRIAMENTO GEOTÉRMICO. **BR102022020524-8**, 2022. Disponível em:

<<https://busca.inpi.gov.br/pePI/servlet/PatenteServletController?Action=detail&CodPedid=1680282&SearchParameter=BR102022020524-8> &Resumo=&Titulo=>. Acesso em: 14 mar. 2023.

ALMEIDA, C.H.A.; SOUTO, C. D. R.; VERONESE, J. P. Characterization of thermoelectric cell for electric power generation. [S.l.]: [s.n.], 2015. V. 2015- July.

ALMEIDA, C H A *et al.* Solid State Thermoelectric Generator (Ssteg) - aRenewable Passive Heat Source. **International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering**, 2022. v. 10, n. 10, p. 15–21.

ALMEIDA, Caique R. DE *et al.* Numerical modelling of a geothermal pile in tropical environment based on a TRT Test. **E3S Web of Conferences**, 2020. v. 205.

ALMEIDA, Caique Roberto De. **Análise Do Comportamento Térmico De Estacas Geotérmicas Em Solo Arenoso**. [S.l.]: Universidade de São Paulo - USP, 2021.

ALMEIDA, Caique Roberto DE *et al.* Numerical study on heat transfer performance of geothermal piles in a Brazilian sandy soil. **Soils and Rocks**, 1 jan. 2022. v. 45, n. 1.

ALMEIDA, Carlos Henrique Alencar *et al.* Estudo da viabilidade energética da energia solar no sertão da Paraíba em comparação as principais formas de geração de energia elétrica. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, 18 mar. 2019. v. 02, n. 03, p. 23–37. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/meio-ambiente/viabilidade-energetica>>.

AMÉRICO, R. *et al.* ESTUDOS PRELIMINARES DE MATERIAIS TERMOELÉTRICOS PARA OBTENÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO CALOR RESIDUAL. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, 22 mar. 2019. v. 16, n. 1, p. 8–14. Disponível em: <<https://doi.org/10.4322/2176-1523.20191519>>. Acesso em: 18 maio 2021.

ANEEL. **DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA NACIONAL DE GERAÇÃO HELIOTÉRMICA DE ENERGIA ELÉTRICA**. Brasília, DF: [s.n.], 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PD_Estrategico_019-2015.pdf>. Acesso em: 21 maio 2021.

ARUNKUMAR, T. *et al.* Productivity enhancements of compound parabolic

concentrator tubular solar stills. **Renewable Energy**, 2016. v. 88, p. 391–400. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.051>>.

BBC. Maior torre de energia solar do mundo é construída em deserto de Israel | Mundo | G1. 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mundo/noticia/maior-torre-de-energia-solar-do-mundo-e-construida-em-deserto-de-israel.ghtml>>. Acesso em: 21 maio 2021.

BEERI, O. *et al.* Hybrid photovoltaic-thermoelectric system for concentrated solar energy conversion: Experimental realization and modeling. **Journal of Applied Physics**, 2015. v. 118, n. 11.

BOUGHANMI, H. *et al.* Thermal performance of a conic basket heat exchanger coupled to a geothermal heat pump for greenhouse cooling under Tunisian climate. **Energy and Buildings**, 2015. v. 104, p. 87–96. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.004>>.

CÉSAR, V. *et al.* PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTES DE UM PROTÓTIPO CONCENTRADOR SOLAR FRESNEL LINEAR PARA GERAÇÃO DIRETA DE VAPOR PARA PROCESSOS INDUSTRIAIS. Gramado: [s.n.], 2018.

CHEN, W. H. *et al.* Modeling and simulation for the design of thermal-concentrated solar thermoelectric generator. **Energy**, 2014. v. 64, p. 287–297. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.073>>.

COP26: confira as principais decisões do Pacto Climático de Glasgow. [s.d.]. Disponível em: <<https://www.alemdaenergia.engie.com.br/cop26-confira-as-principais-decisoes-do-pacto-climatico-de-glasgow/>>. Acesso em: 7 nov. 2023.

CRUZ SANTOS, A. *et al.* PERFORMANCE ANALYSIS OF A LINEAR FRESNEL CONCENTRATOR WITH A MOVING ABSORBER. Uberlândia: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/337752064_PERFORMANCE_ANALYSIS_OF_A_LINEAR_FRESNEL_CONCENTRATOR_WITH_A_MOVING_ABSORBER>. Acesso em: 24 maio 2021.

DAI, Y. J. *et al.* Investigation on a mini-CPC hybrid solar thermoelectric generator

unit. **Renewable Energy**, 2016. v. 92, p. 83–94.

DIAS, A.; MACIEL, A. **Eletricidade Básica: Para Cursos Técnicos**. João Pessoa, Pb: Editora IFPB, 2019.

ELMINSHAWY, N. A. S. *et al.* Experimental investigation of a V-trough PV concentrator integrated with a buried water heat exchanger cooling system. **Solar Energy**, 2019. v. 193, n. April, p. 706–714. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.013>>.

ESLAMI-NEJAD, P. *et al.* Solar heat injection into boreholes. **4Th Canadian Solar Building Conference**, 2009. p. 237–246.

FUCUCHIMA, L. Cesp inicia operação de 1ª usina termossolar do Brasil, estuda novas tecnologias - 21/03/2022 - UOL Economia. 2022. Disponível em: <<https://economia.uol.com.br/noticias/reuters/2022/03/21/cesp-inicia-operacao-de-1-usina-termossolar-do-brasil-estuda-novas-tecnologias.htm>>. Acesso em: 19 abr. 2022.

GE, M. *et al.* Performance analysis of a solar thermoelectric generation (STEG) system with spray cooling. **Energy Conversion and Management**, 2018. v. 177, n. October, p. 661–670. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.016>>.

GOUPIL, C. **Continuum Theory and Modeling of Thermoelectric Elements**. [S.l.]: Wiley Blackwell, 2016.

GRIFFITH. What Makes Geothermal Cooling So Efficient for Baltimore, MD Homes? 2019. Disponível em: <<https://www.griffithenergyservices.com/blog/what-makes-geothermal-cooling-so-efficient-for-baltimore-md-homes>>. Acesso em: 2 ago. 2023.

GUIMARÃES BARBOSA, E. *et al.* Exergetic, enviroeconomic and exergoeconomic (3E) assessment of a stationary parabolic trough solar collector with thermal storage. **Solar Energy**, 1 maio. 2023. v. 255, p. 487–496.

GUIMARÃES, E. T. Sistemas Geotérmicos no Brasil Desafios e Oportunidades. 24 fev. 2016. Disponível em: <http://www.protocolodemontreal.org.br/site/images/phb/projeto_gerenciaimento_chillers/seminarios/1291.pdf>. Acesso em: 24 maio 2021.

GUPTA, B. *et al.* Performance enhancement of modified solar still using water sprinkler: An experimental approach. **Perspectives in Science**, set. 2016. v. 8, p. 191–194.

HE, W. *et al.* Influence of different cooling methods on thermoelectric performance of an engine exhaust gas waste heat recovery system. **Applied Energy**, 2016. v. 162, p. 1251–1258. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.036>>.

HOSSAIN, M. S. *et al.* Thermal and economic analysis of low-cost modified flat-plate solar water heater with parallel two-side serpentine flow. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2016. v. 123, n. 1, p. 793–806.

KRAEMER, D. *et al.* High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration. **Nature Materials**, 2011. v. 10, n. 7, p. 532–538.

_____ *et al.* Modeling and optimization of solar thermoelectric generators for terrestrial applications. **Solar Energy**, 2012. v. 86, n. 5, p. 1338–1350. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.01.025>>.

LI, G. *et al.* Experiments and a simplified theoretical model for a water-cooled, stove-powered thermoelectric generator. **Energy**, 2019. v. 185, p. 437–448. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.023>>.

LIU, Z. H. *et al.* Thermal performance of an open thermosyphon using nanofluid for evacuated tubular high temperature air solar collector. **Energy Conversion and Management**, 2013. v. 73, p. 135–143. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.010>>.

LOPEZ-PASCUAL, D. *et al.* Theoretical modelling and optimization of a geothermal cooling system for solar photovoltaics. **Renewable Energy**, 1 abr. 2023. v. 206, p. 357–366.

LV, H. *et al.* Compact Water-Cooled Thermoelectric Generator (TEG) based on a portable gas stove. **Energies**, 2018. v. 11, n. 9.

MARMOUSH, M. M. *et al.* A novel merging Tubular Daylight Device with Solar Water Heater – Experimental study. **Renewable Energy**, 2018. v. 125, p. 947–961. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.031>>.

MIAO, L. *et al.* Experimental Performance of a Solar Thermoelectric Cogenerator Comprising Thermoelectric Modules and Parabolic Trough Concentrator without Evacuated Tube. **Journal of Electronic Materials**, 2015. v. 44, n. 6, p. 1972–1983.

MILJKOVIC, N.; WANG, E. N. Modeling and optimization of hybrid solar thermoelectric systems with thermosyphons. **Solar Energy**, 2011. v. 85, n. 11, p. 2843–2855. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.021>>.

MOUCHOT, A. **(La) Chaleur solaire et ses applications industrielles de Augustin Mouchot – Livros no Google Play**. Gauthier-V ed. Paris: [s.n.], 1869.

NASCIMENTO, G. S. Do *et al.* MAPEAMENTO GLOBAL DAS USINAS DE ENERGIA SOLAR HELIOTÉRMICA. Fortaleza, Ce: [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/804/804>>. Acesso em: 22 maio 2021.

PEREIRA, A. *et al.* High temperature solar thermoelectric generator - Indoor characterization method and modeling. **Energy**, 2015. v. 84, p. 485–492.

PEREIRA, B.; ANDRADA, L. PL 2215/2020 — Portal da Câmara dos Deputados - Portal da Câmara dos Deputados. . 2020.

PNUD, IPEA, F. **Desenvolvimento humano nas macrorregiões: 2016**. [S.l.]: [s.n.], 2016.

SALIH, M. M. M. *et al.* An experimental investigation of a double pass solar air heater performance: A comparison between natural and forced air circulation processes. **Solar Energy**, 2019. v. 193, n. June, p. 184–194. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.060>>.

SILVI, C. **USO DELL’ENERGIA SOLARE: STORIA, PRESENTE E FUTURO**. Genova, It: [s.n.], 2014. Disponível em: <www.stamperiabrigati.it>. Acesso em: 21 maio 2021.

STYLIANOU, I. I. *et al.* Modeling of vertical ground heat exchangers in the presence of groundwater flow and underground temperature gradient. **Energy and Buildings**, 1 jun. 2019. v. 192, p. 15–30.

TEMPLETON, J. D.; HASSANI, F.; GHOREISHI-MADISEH, S. A. Study of effective solar energy storage using a double pipe geothermal heat exchanger. **Renewable Energy**, 2016. v. 86, p. 173–181. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.024>>.

TOSIN, F.; KURODA, W. T. **A INTRODUÇÃO DO VEÍCULO ELÉTRICO NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA: SITUAÇÃO ATUAL E PROJEÇÕES**. CURITIBA: [s.n.], 2019.

UR REHMAN, N.; SIDDIQUI, M. A. Critical Concentration Ratio for Solar Thermoelectric Generators. **Journal of Electronic Materials**, 2016. v. 45, n. 10, p. 5285–5296.

VINING, C. B. An inconvenient truth about thermoelectrics. **Nature Materials**, 2009. v. 8, n. 2, p. 83–85.

WANG, Deqi *et al.* Numerical and analytical analysis of groundwater influence on the pile geothermal heat exchanger with cast-in spiral coils. **Applied Energy**, 2015. v. 160, p. 705–714. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.037>>.

WANG, P. Y.; LI, S. F.; LIU, Z. H. Collecting performance of an evacuated tubular solar high-temperature air heater with concentric tube heat exchanger. **Energy Conversion and Management**, 2015. v. 106, p. 1166–1173. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.058>>.

ZAYED, M. E. *et al.* Recent advances in geothermal energy reservoirs modeling: Challenges and potential of thermo-fluid integrated models for reservoir heat extraction and geothermal energy piles design. **Journal of Energy Storage**, 1 jun. 2023. v. 62, p. 106835.

ZHANG, H. *et al.* Experimental and simulation studies on a novel compound parabolic concentrator. **Renewable Energy**, 2017. v. 113, p. 784–794. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.044>>.

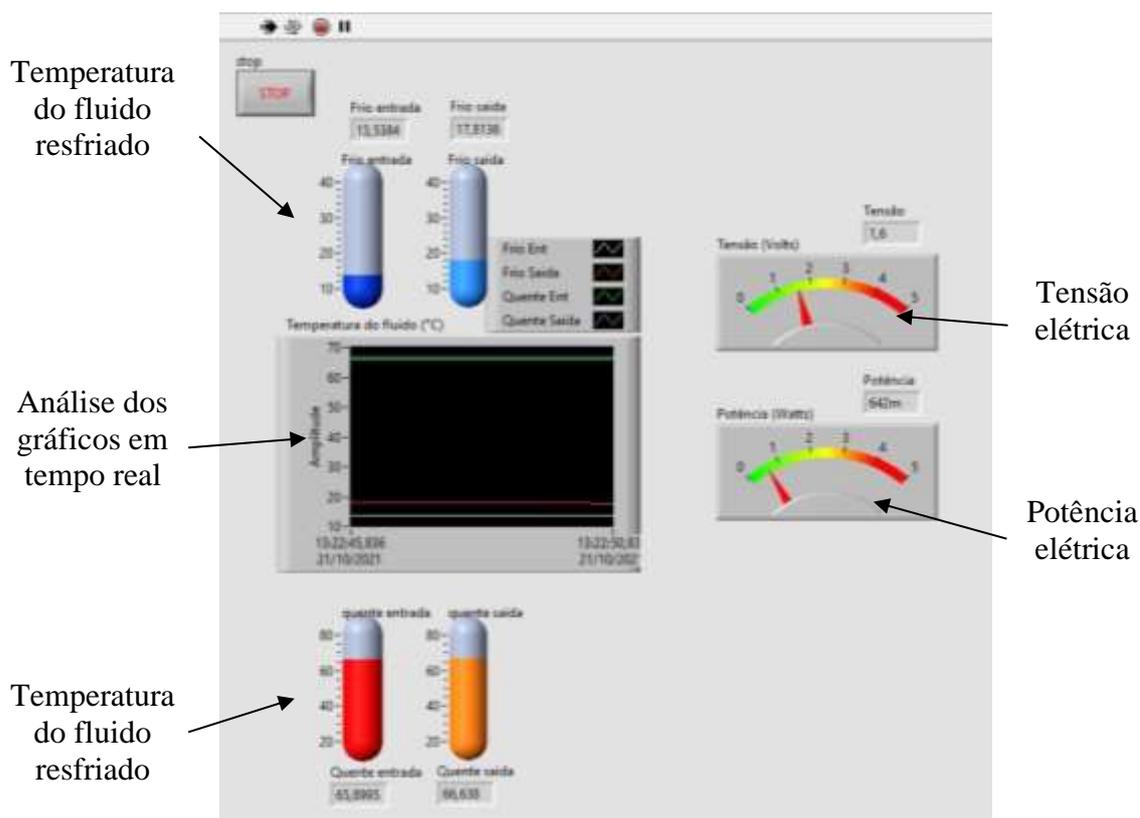
ZHOU, L. *et al.* Study on the Influence of the Cold-End Cooling Water Thickness on the Generative Performance of TEG. **Journal of Electronic Materials**, 2017. v. 46, n. 5, p. 2576–2586.

APÊNDICE

INTERFACE DE AQUISIÇÃO DE DADOS DO MODELO SIMPLIFICADO

A Figura 64 representa uma captura de tela do sistema de aquisição durante o experimento, no momento que os valores estavam estabilizados um pouco antes de desligar o sistema (13:22 h).

Figura 64– Captura de tela do supervisor do sistema de aquisição durante o experimento (às 13:22 h).

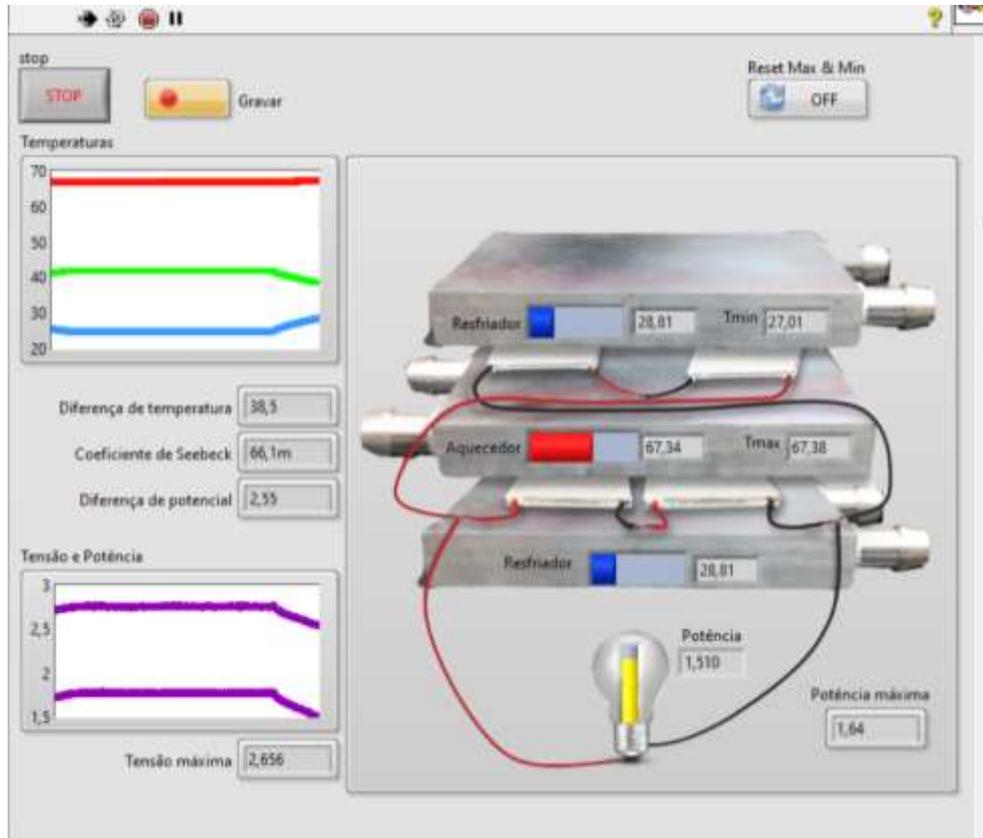


Na interface, é possível analisar em tempo real o comportamento das variáveis armazenadas para a composição dos gráficos das figuras anteriores. À esquerda é possível observar quatro termômetros responsáveis pela leitura instantânea das temperaturas nos terminais dos blocos dissipadores. À direita a leitura instantânea dos valores de tensão e potência elétricas. Ao centro, a análise dos gráficos em uma janela de tempo de 5 segundos. Na ocasião da captura de tela, destaca-se o desempenho do sistema, que apresentou uma

potência elétrica de aproximadamente 600 mW com tensão de 1,6 V, quando a diferença de temperatura se aproximava dos 50 °C.

INTERFACE DE AQUISIÇÃO DE DADOS DO MODELO PRINCIPAL

Figura 65– Captura de tela da interface do sistema de aquisição de dados em pleno funcionamento.



Uma captura de tela desta interface em pleno funcionamento é apresentada na Figura 65. A figura desta interface se assemelha à montagem real observada na Figura 37, onde é possível identificar tanto os dissipadores quanto os módulos termelétricos associados da Figura 38. Na janela “Temperaturas” o traço de cor azul representa a temperatura média dos blocos resfriadores. Em vermelho a média de temperatura do bloco aquecedor. Na cor verde, está a subtração aritmética simultânea das temperaturas dos blocos de aquecimento e de resfriamento. O valor instantâneo da linha de cor verde está na caixa “diferença de temperatura”. Os valores instantâneos das temperaturas dos blocos estão expostos sobre as imagens dos blocos, com as inscrições “resfriador” e “aquecedor”. Nesta análise, devido a pequena variação de temperatura do fluido ao passar pelos blocos resfriadores e aquecedor, as temperaturas apresentadas na interface correspondem à média entre as temperaturas de

entrada e saída de cada bloco, simplificando a interface a fim de facilitar seu entendimento. A potência elétrica produzida é representada pela figura de uma lâmpada e é atualizada em tempo real na caixa “Potência”. Os gráficos de “tensão e potência” elétricas estão sendo analisados simultaneamente aos gráficos das temperaturas.