



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

Ciências Ambientais

JUAN DOMINGUES

**CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE GERADORES
TERMOELÉTRICOS NA CAPTAÇÃO DE CALOR RESIDUAL**

Sorocaba
2022

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

*ciências
ambientais*



unesp
Sorocaba

JUAN DOMINGUES

**CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE GERADORES
TERMOELÉTRICOS NA CAPTAÇÃO DE CALOR RESIDUAL**

Dissertação de mestrado apresentada
como requisito para a obtenção do título de
Mestre em Ciências Ambientais da
Universidade Estadual Paulista "Júlio de
Mesquita Filho" na Área de Concentração
Diagnóstico, Tratamento e Recuperação
Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Antonio Cesar
Germano Martins

Coorientador: Prof. Dr. Ivando Severino
Diniz

Sorocaba
2022

D671c	Domingues, Juan Caracterização e aplicação de geradores termoeletricos na captação de calor residual / Juan Domingues. -- Sorocaba, 2022 79 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba Orientador: Antonio Cesar Germano Martins Coorientador: Ivando Severino Diniz 1. Gerador termoeletrico. 2. Energia limpa. 3. Efeito Seebeck. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE GERADORES TERMOELÉTRICOS
NA CAPTAÇÃO DE CALOR RESIDUAL

AUTOR: JUAN DOMINGUES

ORIENTADOR: ANTONIO CESAR GERMANO MARTINS

COORDENADOR: IVANDO SEVERINO DINIZ

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em CIÊNCIAS AMBIENTAIS,
área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ANTONIO CESAR GERMANO MARTINS (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia UNESP Campus de Sorocaba

Prof. Dr. PEDRO MIGUEL REBELO RESENDE (Participação Virtual)
Engenharia Mecânica e de Materiais / Instituto Politécnico de Viana do Castelo - Portugal

Prof. Dr. PAULO SERGIO TONELLO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia UNESP Sorocaba

Sorocaba, 30 de agosto de 2022

RESUMO

A Agência Internacional de Energia (AIE) constatou que quase 1,3 bilhões de pessoas ainda não têm eletricidade em suas casas e para este grupo a geração de energia acontece predominantemente através da combustão de biomassa. Tal modelo de produção de energia é pouco eficiente e por este motivo uma grande quantidade de calor é rejeitado. Uma das formas de se reaproveitar esta energia desperdiçada é através dos geradores termoelétricos (TEG) que possuem a capacidade de realizar a conversão de calor em energia elétrica de forma limpa e direta. Esta pesquisa realizou a caracterização e a construção de um gerador termoelétrico para recuperação de calor residual em fornos de queima de biomassa. As curvas características de um gerador elétrico foram obtidas experimentalmente e notou-se que a medida em que a diferença de temperatura estabelecida no TEG aumenta, sua potência elétrica também aumenta. O desempenho do TEG neste ensaio mostrou-se satisfatório, sendo possível dispositivo gerar aproximadamente 6W de potência com uma diferença de temperatura de 200°C. A construção do protótipo de um fogão termoelétrico foi viabilizada a partir da análise da caracterização do módulo termoelétrico, que se mostrou suficiente para atender a demanda energética da aplicação proposta que é de se carregar um celular. O fogão termoelétrico foi capaz de produzir uma potência máxima nas condições reais de aplicação de 3,09 W, com uma tensão de saída de 2,83 V. Este resultado é bastante atrativo, pois demonstra a viabilidade técnica de aplicação de módulos termoelétricos em processos de captação de energia térmica residual para a conversão em potência elétrica útil.

Palavras-chave: Reaproveitamento de energia. Módulo termoelétrico. Efeito Seebeck. Energia Limpa.

ABSTRACT

The International Energy Agency (IEA) found that almost 1.3 billion people still do not have electricity in their homes and for this group, energy generation happens predominantly through the combustion of biomass. Such a model of energy production is inefficient and for this reason a large amount of heat is rejected. One of the ways to reuse this wasted energy is through thermoelectric generators (TEG), which have the ability to convert heat into electrical energy in a clean and direct way. This research carried out the characterization and construction of a thermoelectric generator for waste heat recovery in biomass burning furnaces. The characteristic curves of an electric generator were obtained experimentally, and it was noticed that as the temperature difference is established in the TEG increases, its electrical power also increases. Its performance in this test was satisfactory, the device managed to generate approximately 6W of power with a temperature difference of 200°C. The construction of the prototype of a thermoelectric stove was made possible from the analysis of the characterization of the thermoelectric module, which proved to be sufficient to meet the energy demand of the proposed application. The thermoelectric stove was able to produce a maximum power under real application conditions of 3.09 W, with an output voltage of 2.83 V. This result is quite attractive, as it demonstrates the technical feasibility of applying thermoelectric modules in processes of capturing residual thermal energy for conversion into useful electrical power.

Keywords: Energy reuse. Thermoelectric module. Seebeck effect. Clean energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fontes de energia do ambiente utilizadas para captação de energia	16
Figura 2 - Recuperação da energia elétrica do calor residual usando um módulo termoelétrico.....	17
Figura 3 - Linha histórica da evolução da termoeletricidade.	19
Figura 4- Esquema de um termopar de um gerador termoelétrico.....	21
Figura 5- Esquema de um termopar de um gerador termoelétrico.....	22
Figura 6 - Ilustração de um módulo termoelétrico.	22
Figura 7 - Ilustração do princípio de funcionamento de um TEG	23
Figura 8 - Variação de S , σ , κ e ZT em função da concentração de portadores	25
Figura 9 - Eficiência do Módulo em função de ZT para diferentes temperaturas	26
Figura 10 - Gerador elétrico real	27
Figura 11 – Curva característica de um gerador elétrico.....	28
Figura 12 - Diagrama de composição básica de um fogão de biomassa	29
Figura 13 - Potência de saída vs temperatura da fonte quente.....	30
Figura 14 - Sistema de resfriamento por convecção natural do ar	31
Figura 15 - Fogão de biomassa resfriado por convecção natural do ar .	32
Figura 16 - Arranjo de um sistema de convecção forçada a ar	32
Figura 17 - Fogão de biomassa da Royal Philips Electronics	33
Figura 18 - Fogão de biomassa da Rochester Institute of Technology (RIT) ...	34
Figura 19 - Ilustração da visão em perspectiva frontal e superior do Fogão de biomassa da Rochester Institute of Technology (RIT).....	34
Figura 20– Fogão de biomassa da Roben woodsman	35
Figura 21 – Desempenho de materiais semicondutores em diferentes temperaturas	36
Figura 22 - Módulo termoelétrico TEC-12706	37
Figura 23 - Módulo termoelétrico TG 12-8 L.....	38
Figura 24 - Bancada experimental	39
Figura 25– Diagrama de Blocos do aparato experimental	39
Figura 26 - Fonte fria.....	41

Figura 27 – Materiais utilizados na construção da fonte fria	42
Figura 28 - Controlador de temperatura	43
Figura 29 - Fonte Quente – Chapa Aquecedora Cienlab	44
Figura 30 - Arduino Nano	45
Figura 31 – Placa Protoboard.....	46
Figura 32 - Resistor de potência	47
Figura 33 – Sensor de temperatura MAX6675	48
Figura 34 – Sensor de corrente ACS712	49
Figura 35 - Senso de tensão 0-25 V.....	50
Figura 36 - Sistema de aquisição de dados	51
Figura 37 - Diagrama esquemático das ligações realizadas para a construção do sistema de aquisição de dados	43
Figura 38 - Suportes de alumínio para a instalação do módulo TEG	44
Figura 39 - Instalação do módulo termoeletrico entre as placas de alumínio... ..	45
Figura 40 - Detalhe da localização do TEG na bancada experimental.....	45
Figura 41 - Representação em 3D do fogão termoeletrico, medidas em centímetros (cm)	48
Figura 42 - Design e funcionalidades da câmara de combustão.....	48
Figura 43 – Módulo TEG instalado entre a sonda e o dissipador de calor	49
Figura 44 – Parâmetro de desempenho do módulo termoeletrico TG-12 8	49
Figura 45 – Módulo UPS carregador 1s step up	50
Figura 46 - Materiais utilizados para construção do fogão termoeletrico	51
Figura 47 – Protótipo do fogão termoeletrico	52
Figura 48 - Aparato experimental para realizar a validação dos sensores de corrente e tensão	53
Figura 49 - Gráfico comparativo de medidas de corrente entre o multímetro e o sensor de corrente	54
Figura 50 - Gráfico comparativo de medidas de corrente entre o multímetro e o sensor de tensão.....	55
Figura 51 – Validação do sensor de temperatura.....	55
Figura 52 - Desempenho da fonte fria.....	56
Figura 53 – Gráfico da tensão em função da diferença de temperatura para o ensaio de circuito aberto	57
Figura 54 - Curva característica (I vs V) do módulo termoeletrico.....	58

Figura 55 - Curva característica (P vs V) do módulo termoeletrico	59
Figura 56 - Curva de potência útil do módulo termoeletrico	60
Figura 57 - Experimento para se determinar a variação de temperatura no fogão termoeletrico em condições reais de aplicação	61
Figura 58 – Rampa de aquecimento aplicada no fogão termoeletrico	62

SUMÁRIO

1. Introdução, justificativas e objetivos	11
2. Revisão bibliográfica.....	15
2.1 Uma breve história da termoeletricidade	15
2.2 Os fenômenos termoelétricos.....	19
2.3 Geradores termoelétricos (TEG)	20
2.4 O efeito Seebeck e os geradores termoelétricos.....	21
2.5 Parâmetros de eficiência termoelétrica	24
2.6 Princípios dos geradores elétricos	26
2.7 Geradores termoelétricos aplicados em processos de cogeração de energia em fornos de biomassa	29
2.7.1 Convecção natural resfriada a ar	31
2.7.2 Convecção forçada resfriada a ar	32
2.7.3 Convecção natural resfriada a água.....	35
3. Metodologia.....	36
3.1 Escolha de um gerador termoelétrico (TEG)	36
3.2 Bancada experimental e a caracterização de módulos termoelétricos.....	38
3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA BANCADA EXPERIMENTAL.....	40
3.4 Construção do sistema de aquisição de dados	44
3.4.1 Placa protoboard	46
3.4.2 Resistor de potência.....	46
3.4.3 Sensor de temperatura MAX6675 com termopar tipo K.....	47
3.4.4 Sensor de corrente ACS712.....	48
3.4.5 Sensor de tensão 0-25V	49
3.4.6 Programação, montagem e validação do sistema de aquisição de dados	50

3.4.7 Preparação do módulo termoeletrico para a instalação na bancada experimental.....	44
3.4.8 Procedimento experimental.....	46
3.4.9 Protótipo do fogão termoeletrico	47
4. Resultados e discussões.....	53
4.1 Validação do sistema de aquisição de dados.....	53
4.2 Caracterização do módulo termoeletrico	56
4.2.1 Ensaio de circuito aberto	56
4.2.3 Ensaio de circuito fechado	58
4.3 Análise do desempenho do fogão termoeletrico	61
5. Conclusões.....	64
Referências bibliográficas	66
Anexo A – Algoritmo utilizado no sistema de aquisição de dados.....	71
Anexo B – Ficha de dados TG12-8	77
Anexo C – Tabela de custos para a construção do protótipo do fogão termoeletrico.....	79

1. Introdução, justificativas e objetivos

A Agência Internacional de Energia (AIE) a pedido da Organização das Nações Unidas (ONU) realizou um estudo estatístico sobre a quantidade de pessoas ainda sem acesso à energia no mundo. Este levantamento que tomou como base o ano de 2018 e se embasou em informações oficiais dos governos revelou dados alarmantes: quase 1,3 bilhões de pessoas ainda não têm eletricidade em suas casas e 2,6 bilhões de habitantes não dispõem de energia elétrica ou de gás natural (GLP) para cozinhar (ONU, 2020).

No Brasil estima-se que cerca de 2 milhões de pessoas ainda não possuem acesso à energia elétrica. Estima-se também que mais de 3 bilhões de pessoas no mundo cozinham usando combustíveis de biomassa sólida, como madeira, resíduos agrícolas, carvão e esterco animal (ONU, 2020). Como consequência a Organização Mundial da Saúde calcula que 4,3 milhões de pessoas morrem prematuramente a cada ano de doenças atribuíveis à poluição do ar doméstico pela queima de combustíveis sólidos. Isso inclui câncer de pulmão, acidente vascular cerebral, doença cardíaca, doença pulmonar e pneumonia infantil (BRUCE, 2019).

A exposição à fumaça interna é particularmente alta entre mulheres e crianças, que normalmente são responsáveis por cozinhar. A responsabilidade de obter combustível para cozinhar e aquecer também recai predominantemente sobre as mulheres, que passam horas todos os dias coletando lenha para suas casas, reduzindo seu potencial para estudar ou realizar outras atividades (SESAN, 2011).

Devido à queima de madeira, carvão e querosene no interior das residências, a poluição do ar doméstico - *household air pollution* (HAP) é um dos principais fatores de risco para doenças, incluindo pneumonia infantil, distúrbio pulmonar obstrutivo crônico, doença cardíaca isquêmica, derrame e câncer de pulmão. As emissões da cozinha doméstica são uma fonte significativa de poluição do ar ambiente e um contribuinte para as mudanças climáticas. Globalmente, cerca de quatro milhões de pessoas morrem prematuramente todos os anos de doenças atribuíveis à HAP (OMS, 2020).

No Brasil, 14 milhões de famílias brasileiras usavam lenha ou carvão para cozinhar em 2019, segundo dados divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). São cerca de 3 milhões de famílias a mais que em 2016 (IBGE, 2019). O número representa quase 20% das famílias brasileiras, ou seja, a cada cinco famílias, uma usava lenha ou carvão para cozinhar no ano de 2019. Em 2016, essa fatia era de 16%, ou pouco mais de uma a cada seis famílias (IBGE, 2019). Com o advento da pandemia em 2020 e as restrições orçamentárias que ela acarretou, o IBGE não divulga esses indicadores há quase dois anos. Por isso, esses números já não refletem a realidade de um país que passa por um acelerado processo de empobrecimento, que gera como uma de suas consequências diretas a exclusão energética.

Apesar do diagnóstico de que a exclusão no acesso à energia elétrica está essencialmente associada à falta de oferta, é fundamental considerar que políticas de universalização devem estar sempre acompanhadas de mecanismos que possibilitem aos cidadãos mais pobres financiarem o “consumo” de tais serviços. Sem um equilíbrio entre essas duas dimensões, somadas ao agravamento da crise econômica gerada pela pandemia, o cenário de acessibilidade aos recursos energéticos no Brasil se mostra bastante grave (IBGE, 2019). O desafio de minimizar a exclusão energética passa necessariamente por questões que tangem o desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis de produção de energia.

A discussão acerca do máximo aproveitamento possível dos combustíveis abre espaço para o estudo dos processos de reciclagem energética, sendo que a cogeração talvez seja um dos exemplos mais representativos do potencial ignorado no uso eficiente dos recursos energéticos.

Nesse sentido os sistemas de reciclagem de energia têm recebido uma grande ênfase nas pesquisas, com destaque para a termoeletricidade que é o ramo da ciência que estuda os mecanismos de transformação direta de energia térmica em elétrica e de energia elétrica em térmica (BORBA, 2019).

Para a grande quantidade de pessoas que são excluídas energeticamente no Brasil e no mundo, a combustão de biomassa é a única forma de obtenção de energia. Portanto a utilização da termoeletricidade em processos de cogeração em fornos de combustão de biomassa, pode se mostrar uma alternativa promissora no processo de recuperação do calor residual rejeitado.

Do ponto de vista energético, biomassa é toda matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia (Haslinger., et al 2005).

Inserido neste contexto, muitas pesquisas estão focadas no desenvolvimento de geradores termoeletricos (TEG – thermoelectric generator) que são dispositivos semicondutores de estado sólido que captam e convertem a diferença de temperatura em energia elétrica, sendo que o fenômeno físico que governa esta conversão é chamado de efeito Seebeck (ALMEIDA, 2015).

A captação representa a energia derivada de fontes ambientais que é extraída e convertida diretamente em energia elétrica sendo aplicada quando há uma correspondência entre a energia disponível e a energia necessária. Outro termo da área, a eliminação de energia, refere-se a um ambiente ou um sistema em que existem perdas de energia. As fontes de energia do ambiente utilizadas para captação de energia são gradientes de temperatura, radiação eletromagnética, luz, movimento e energia química (MARTINS, 2007).

A expressiva demanda por captação de energia termelétrica justifica-se pelo desenvolvimento de novos materiais termoeletricos e pelo projeto de novos dispositivos TEG. Além disso, os dispositivos de captação de energia termoeletrica são usados para a captação de calor residual em aplicações em microescala. Potenciais aplicações de TEG como módulos de captação de energia são usados em dispositivos médicos, sensores, edifícios e produtos eletrônicos (MARTINS, 2007).

Os usos destes dispositivos oferecem vantagens em relação aos conversores de energia convencionais. Dentre essas vantagens pode-se destacar que, estes são dispositivos leves, compactos, duráveis (por não possuírem partes móveis), tem baixo nível de ruído e podem ser utilizados em sistemas sustentáveis de geração de energia ou em processos de refrigeração (PICHANUSAKORN; BANDARUP, 2010).

A principal desvantagem no uso desses dispositivos é a sua baixa eficiência em comparação com geradores elétricos convencionais. Entretanto, existem áreas específicas de aplicação em que as vantagens dos geradores termoeletricos sobressaem as desvantagens. Dentre elas pode-se destacar o caso de populações que não são contempladas pelo alcance da distribuição de energia elétrica (SALES, 2001; DIMITRIEV; ZVYAGIN, 2010).

É nítido o entendimento acerca da necessidade do desenvolvimento e aplicação de tecnologias alternativas à geração de energia elétrica. Muito embora os argumentos se alternem entre sustentabilidade ambiental, a questão econômica e social, é fato que o estudo e aplicação de fontes alternativas e renováveis de geração de energia elétrica são essenciais e evidentes frente às tendências mundiais.

Este trabalho tem como objetivo caracterizar e construir um gerador termoelétrico para aplicações em fornos de combustão de biomassa, conhecidos popularmente como fogões a lenha.

Primeiramente realizou-se a caracterização de geradores termoelétricos comerciais a fim de se demonstrar seu potencial na conversão de energia térmica em elétrica. Em seguida, a partir dos dados experimentais obtidos em laboratório, construiu-se um protótipo de um gerador termoelétrico baseado no efeito Seebeck, customizado e adaptado para aplicações em fornos de biomassa, no intuito de promover uma melhoria dos fogões a lenha utilizando o calor desprendido pela câmara de combustão para a geração de energia elétrica.

Pretende-se mostrar com esta pesquisa que o sistema de produção de energia através de fornos de biomassa é uma solução parcial de fornecimento energético para residências em situação de exclusão energética. A eletricidade gerada pela conversão de energia através do efeito Seebeck poderá ser usada para a iluminação do ambiente e para carregar pequenos aparelhos eletrônicos, como por exemplo, um celular.

2. Revisão bibliográfica

Decidiu-se realizar uma investigação histórica sobre a natureza termoelétrica dos materiais, desta forma foi possível identificar novos horizontes na área de conhecimento da termoeletricidade, além de contextualizar teoricamente este trabalho, permitindo encontrar respostas substanciais às próprias questões que foram motivacionais a escolha do tema deste projeto. Todo resultado desta pesquisa é descrito em detalhes no decorrer deste capítulo.

2.1 Uma breve história da termoeletricidade

Atualmente a produção e o consumo de energia possuem grande importância para a realização de diversas atividades humanas, o que implica em uma grande quantidade a ser produzida para atender a demanda, que com o passar do tempo aumenta cada vez mais.

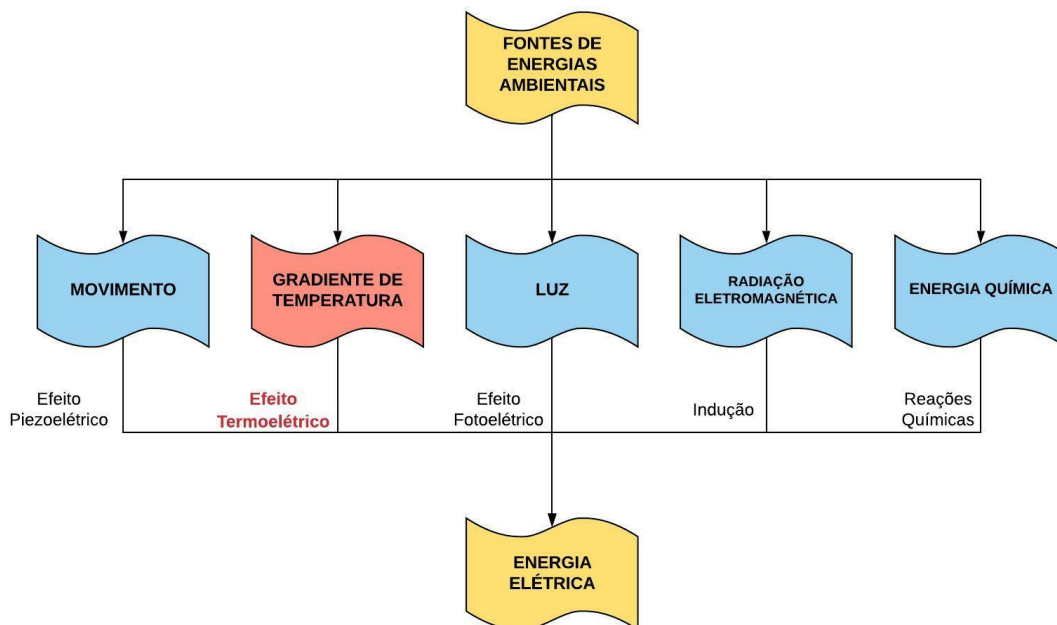
Esse aumento do consumo faz com que pesquisas sejam desenvolvidas com relação a sistemas de captação ou colheita de energia “energy harvesting”, que significa o processo pelo qual a energia derivada de fontes naturais (por exemplo, energia solar, térmica, eólica, cinética), pode ser capturada e armazenada. Em termos simples: diferentes conceitos de captação de energia podem ser utilizados para diferentes processos em que a energia que está sendo fornecida foi anteriormente perdida e não utilizada.

Um sistema de coleta de energia termoelétrica tira proveito de qualquer diferença de temperatura estabelecida no ambiente ou em algum equipamento, fontes de energia desta natureza existem tanto em ambientes naturais quanto artificiais. Encontramos, por exemplo, uma ampla gama de equipamentos operando em temperaturas muito mais altas do que a do ambiente. Para todos esses casos o efeito Seebeck é uma alternativa de aproveitamento do calor perdido, pois este fenômeno se refere ao fato que quando um gradiente de temperatura é estabelecido em algum material metálico, uma potência elétrica correspondente é induzida.

Desta maneira a partir do efeito termoelétrico ou pelo efeito Seebeck, pode-se prover uma pequena quantidade de energia para equipamentos eletrônicos de baixa potência. Diferentes fontes de energia naturais que estão

presentes no ambiente e são gratuitas são ilustradas conforme a Figura 1 (HAYDEN, 2009).

Figura 1 - Fontes de energia do ambiente utilizadas para captação de energia



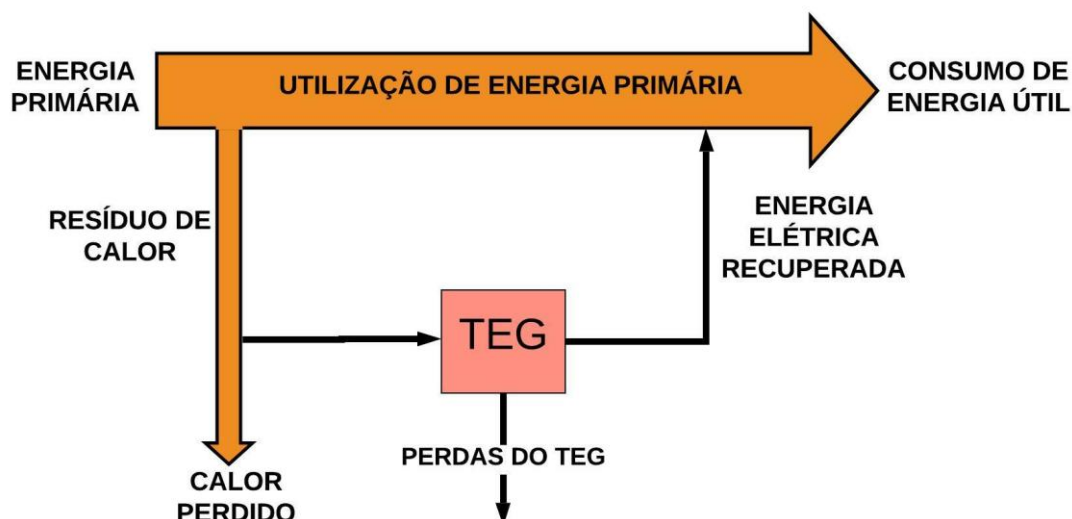
Fonte: Adaptado de Garzon, 2021.

A energia térmica ocupa um lugar especial nas atividades humanas, pois acompanha a maioria dos processos industriais além dos processos que ocorrem na natureza. Na maioria desses casos, o calor é perdido sem nenhum lucro econômico. O uso adequado da energia térmica desperdiçada, conhecida como calor residual, é uma das principais áreas de atuação para introduzir o conceito de eficiência energética e de preservação ambiental, pois visa à máxima utilização do calor gerado. O aumento do rendimento através do calor recuperado pode ser obtido daquele contido nos gases de exaustão, do calor perdido pelas superfícies externas de equipamentos, das perdas de calor em água de resfriamento e ainda do calor acumulado nos produtos e processos nas saídas e/ou entradas de uma linha industrial (H. O'HANLEY, 2009).

O gerador termoeletrico (TEG) possui como objetivo principal produzir eletricidade a partir de uma fonte de calor residual, um conceito que também é frequentemente conhecido como captação ou colheita de energia, é uma maneira muito significativa de aumentar a eficiência energética de um sistema

porque a energia térmica contida no calor residual seria descarregada na atmosfera e simplesmente desperdiçada conforme a Figura 2.

Figura 2 - Recuperação da energia elétrica do calor residual usando um módulo termoeletrico



Fonte: Adaptado de Garzon, 2021.

O fenômeno físico que rege o funcionamento de um TEG é o efeito Seebeck e foi descoberto em 1821, na Alemanha por Thomas Johann Seebeck (1770-1831), médico por formação e especializado em física, quando em um de seus experimentos colocou uma placa de Bismuto (Bi) sobre uma placa de Cobre (Cu) e uniu-as por meio de um fio de cobre a um galvanômetro. Ao pressionar com as mãos tal sistema, notou que o galvanômetro registrava uma polarização magnética (mais adiante associada a corrente elétrica pelo físico Oersted). Em seguida trocou a placa de metal de Bismuto por uma placa de Antimônio e, ao repetir o procedimento, percebeu que a polarização magnética no galvanômetro invertia de sentido. Como primeira constatação Seebeck sugeriu que o fenômeno físico constatado no experimento era ocasionado pelo calor de suas mãos, motivo pelo qual denominou tal fenômeno, de forma equivocada, como um feito termomagnético (MARTINS, 2007).

No ano de 1820 Hans Christian Oersted (1777-1851), já havia publicado pela primeira vez na história, a relação existente entre a eletricidade e o magnetismo, e que após revisão e otimização do experimento de Seebeck no

ano de 1823, concluiu que o diferencial de temperatura promovia o surgimento de corrente elétrica.

Seebeck com o auxílio de Oersted demonstrou que era possível produzir corrente elétrica por meio de um diferencial de temperatura estabelecido na junção de dois materiais condutores diferentes. Após a descoberta de Seebeck, muitos outros cientistas passaram a estudar os efeitos termoeletricos, dos quais podem ser destacados Jean Charles Athanase Peltier (1834), que descreveu o efeito em que é possível se produzir uma diferencial de temperatura em materiais termoeletricos, quando nestes uma diferença de potencial é induzida, a este fenômeno dá-se o nome de efeito Peltier.

Apesar das inúmeras descobertas teóricas no ramo da termoeletricidade, fato que representou um avanço representativo para a ciência, as suas aplicações práticas e comerciais não avançaram na mesma medida, devido principalmente a ineficiência dos materiais existentes na época, afinal ainda não existia no final do século XIX uma liga metálica que resultasse em um termopar com características satisfatórias do ponto de vista que se espera de um material termoeletrico, o que impediu e limitou em termos práticos qualquer aplicação comercial (AHMED, 2009).

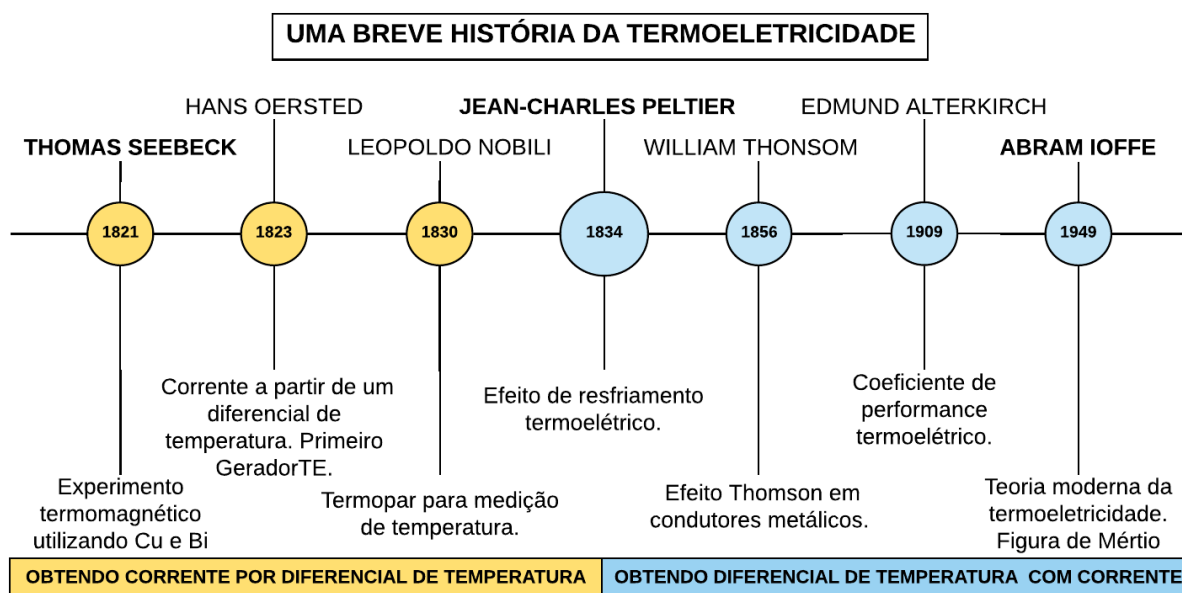
Foi apenas na metade do século XX, mais precisamente durante o final da década de 40, que as descobertas revolucionárias dos materiais semicondutores impulsionaram os estudos da termoeletricidade (ROWE, 1964).

Dentro deste novo panorama científico, insere-se o físico russo Abram Fjodorowitsch Ioffe que publicou no ano de 1947 o conceito de figura de mérito (ZT), bem como sua correlação com temperatura ideal de trabalho. A figura de mérito proposta por Ioffe, deve ser entendida como um parâmetro qualitativo utilizado para a caracterização do desempenho de um dispositivo termoeletrico (PARK et al., 2012).

Por esta descoberta, atribui-se a Ioffe a teoria moderna da termoeletricidade e suas pesquisas foram responsáveis pelo surgimento de uma nova geração de semicondutores mais eficientes e de baixo custo que, por sua vez, possibilitaram a construção dos módulos termoeletricos encontrados atualmente no mercado.

O resultado de toda esta revisão bibliográfica está apresentado esquematicamente na Figura 3 e seu detalhamento foi descrito ao longo desta seção.

Figura 3 - Linha histórica da evolução da termoeletricidade.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

2.2 Os fenômenos termoeletricos

Efeitos termoeletricos são fenômenos que associam diferenças de temperaturas com produção de potência elétrica (CALLEN, 1985; MACDONALD, 1962) (calor diretamente convertido em eletricidade). Esses efeitos podem ser aplicados na construção de conversores de energia usando-se uma classe de materiais conhecidos como materiais termoeletricos (MINNICH et al., 2009). O interesse científico nessa área é crescente, sobretudo devido à necessidade atual de obtenção de fontes alternativas de energia (ALMEIDA, 2015).

Existem três tipos de efeitos termoeletricos: efeito Seebeck, efeito Peltier e efeito Thomson. O primeiro deles ocorre quando há o surgimento de uma diferença de potencial em um circuito elétrico formado por dois materiais distintos devido à diferença de temperatura nas junções.

Quando uma corrente elétrica passa por um circuito fechado formado por dois materiais distintos, uma das junções absorve calor enquanto a outra libera, esse é o chamado efeito Peltier. Baseando-se em evidências experimentais,

Willian Thomson em 1854, propôs uma conexão entre os efeitos Peltier e Seebeck. Isto o levou a definir empiricamente, ou postular a existência do chamado calor de Thomson em um condutor (ALMEIDA, 2015).

Assim, têm-se o seguinte panorama na área de estudo da termoeletricidade:

- Efeito Seebeck - Estabelece que a tensão produzida em um termopar é proporcional à temperatura entre duas junções.
- Efeito Peltier - Estabelece que, se uma corrente flui através de um termopar, uma junção é aquecida (liberação de energia), enquanto a outra junção é resfriada (absorção de energia).
- Efeito Thomson - Estabelece que, quando uma corrente circula ao longo de um condutor no qual existe uma diferença de temperatura, o calor é produzido ou absorvido, dependendo do sentido da corrente e da variação de temperatura.

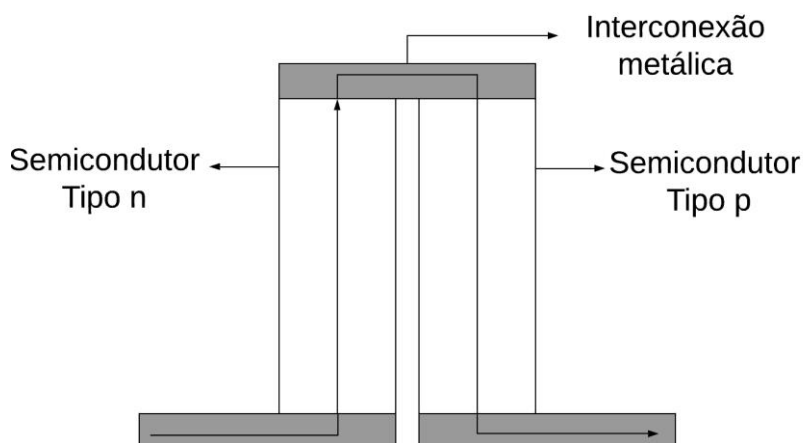
Estes efeitos são obtidos através de dispositivos termoeletricos como por exemplo no termopar, constituído por dois metais unidos de forma a construir uma junção.

O termopar apresentado no próximo item é utilizado como referência de dados para captação de energia neste trabalho e chamado Gerador Termoelétrico (TEG).

2.3 Geradores termoeletricos (TEG)

O elemento básico de um gerador termoeletrico é um termopar constituído por um semicondutor do tipo p e um semicondutor do tipo n, sendo esses conectados eletricamente em série por uma tira de metal que os conecta de acordo com a Figura 4. Estes pares termoeletricos são também conhecidos como termoelementos ou pellets (INCROPERA, et al., 2008).

Figura 4- Esquema de um termopar de um gerador termoelétrico.



Fonte: Adaptado de Fernandes, 2012.

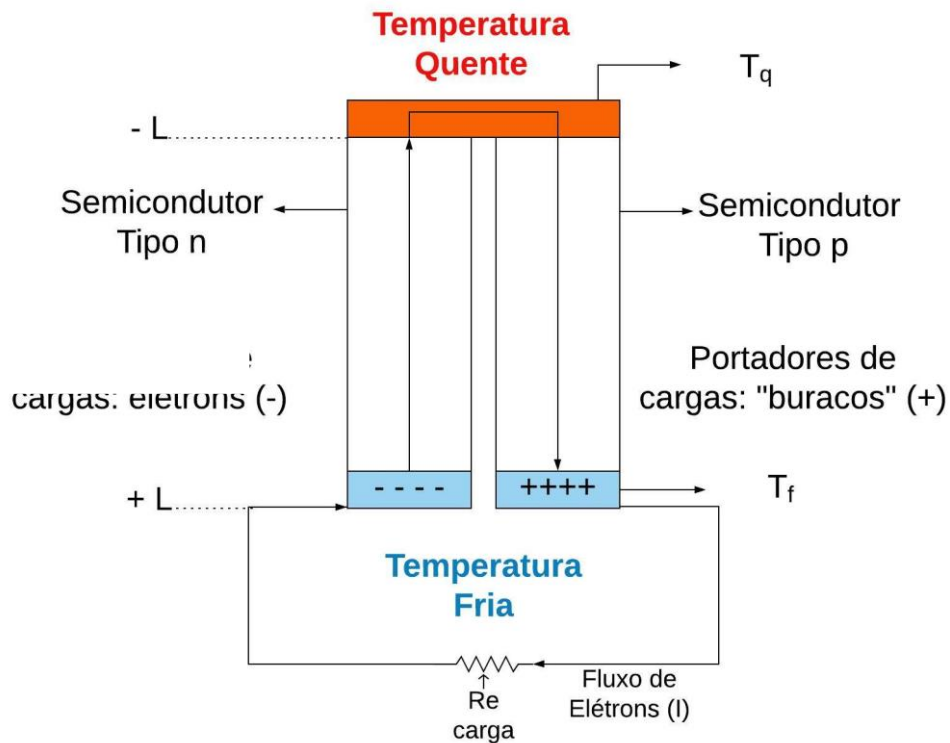
2.4 O efeito Seebeck e os geradores termoelétricos

O efeito Seebeck é uma conversão direta de energia térmica em um potencial elétrico e se manifesta neste dispositivo através do movimento de portadores de carga dentro dos semicondutores. Nos semicondutores do tipo n dopados, os portadores de carga são elétrons e nos semicondutores do tipo p dopados, os portadores de carga são os “buracos” ou lacunas.

Se as extremidades quentes do material tipo n e tipo p estiverem eletricamente conectadas, a tensão produzida pelo efeito Seebeck fará com que a corrente flua através da carga conforme ilustra a Figura 5. Este fenômeno acontece pois os portadores de carga se difundem do lado quente para o lado frio do semicondutor. Essa difusão leva a um acúmulo de portadores de carga em uma extremidade que cria um potencial de elétrico diretamente proporcional à diferença de temperatura no semicondutor (INCROPERA, et al., 2008).

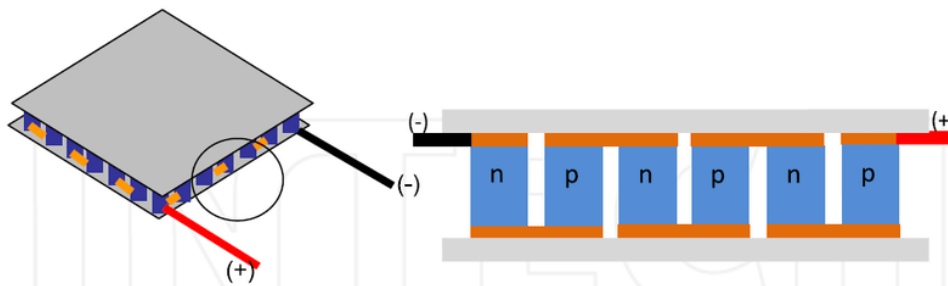
A Figura 5 ilustra o efeito Seebeck em um TEG, em que T_q e T_f são respectivamente a temperatura quente e fria, e a Figura 6 o ilustra em perspectiva.

Figura 5- Esquema de um termopar de um gerador termoeletrico.



Fonte: Adaptado de Fernandes, 2012.

Figura 6 - Ilustração de um módulo termoeletrico.



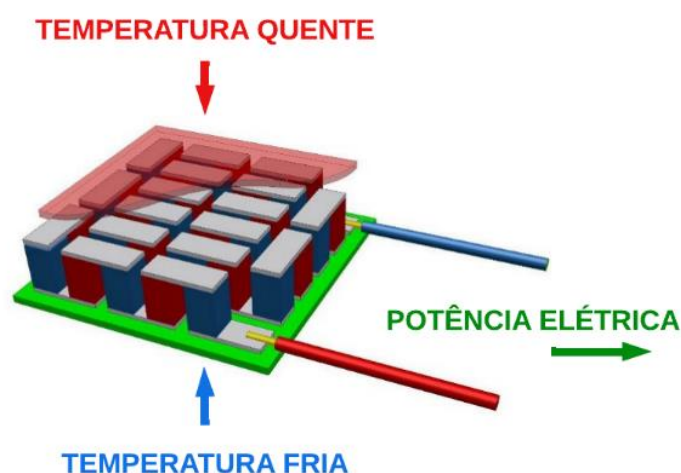
Fonte: Fernandes, 2012

Portanto, geradores termoeletricos (TEG) compreendem estruturas de junções termoeletricas que são conectadas eletricamente em série e termicamente em paralelo.

Dada a natureza dos módulos TEG, enquanto dispositivos de estado sólido sem partes móveis, eles são duráveis e confiáveis, com longo período de vida útil operacional e têm uma estrutura simples. Podendo operar em dois modos:

- Geração de potência elétrica, que se baseia em um princípio físico chamado de efeito Seebeck, que enuncia que na medida que um gradiente de temperatura é estabelecido em um gerador termoelétrico, um gradiente de tensão elétrica correspondente é induzido. A Figura 7 ilustra seu funcionamento.
- Outra forma de operação é através do efeito inverso, conhecido como efeito Peltier, que se refere a produção de um gradiente de temperatura na junção de dois condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando submetidos a uma tensão elétrica em um circuito fechado. Neste caso são comumente utilizados com a finalidade de refrigeração. (SNYDER.C, 2008).

Figura 7 - Ilustração do princípio de funcionamento de um TEG



FONTE: Adaptado de KUBOV, 2016

Geradores termoelétricos são, portanto, dispositivos em estado sólido que convertem diferenças de temperaturas diretamente em energia elétrica. Quanto maior for as diferenças de temperaturas em suas faces, maior será a eficiência e a potência de saída (FORMAN, et al., 2016)

2.5 Parâmetros de eficiência termoelétrica

Apesar do presente estudo ser focado em uma aplicação do efeito Seebeck para a geração de energia limpa utilizando-se de geradores termoelétricos em fogões de biomassa, é interessante compreender os principais parâmetros de eficiência envolvidos a fim de se obter informações prévias e necessárias ao dimensionamento do protótipo.

O coeficiente de Seebeck (S) é uma propriedade do material que representa a proporcionalidade entre gradientes de tensão e temperatura, e possui sua unidade em volt por Kelvin (V/K), conforme equação 1 (INCROPERA, et al., 2008).

$$S = \left(\frac{\Delta V}{\Delta T} \right) \quad (1)$$

onde ΔV é a diferença de potência dada em (V) e ΔT a diferença de temperatura em (°C).

Para que o desempenho dos materiais termoelétricos seja avaliado, foi proposta uma figura de mérito Z que está em função das propriedades do material (Dias, et al., 2017), e é representada pela seguinte equação 2:

$$Z = \frac{S^2 \sigma}{k} \quad (2)$$

onde Z é a figura de mérito do material termoelétrico, S coeficiente Seebeck, σ a condutividade elétrica, e k a condutividade térmica.

A fim de se obter uma figura de mérito adimensional, Z é multiplicada pela temperatura média, resultando na equação 3 (HILLHOUSE; TUOMINEN, 2001).

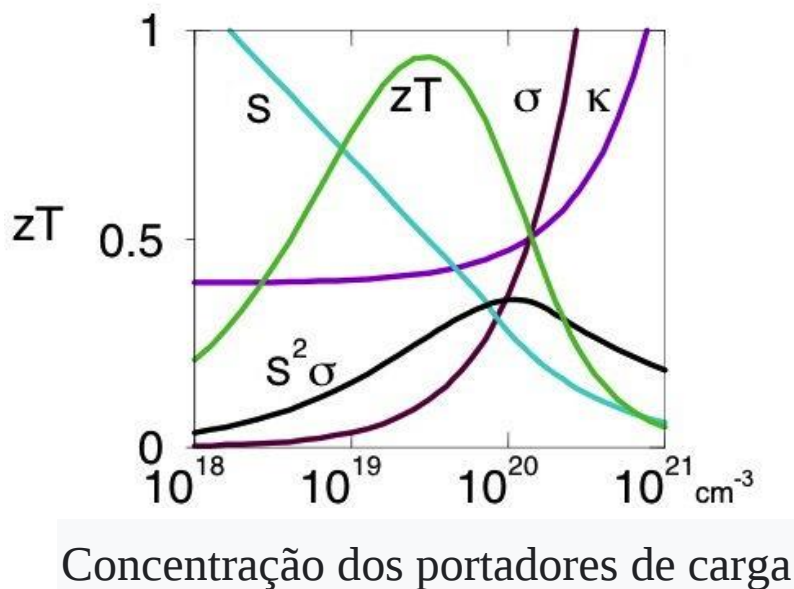
$$ZT = \frac{S^2 \sigma \bar{T}}{k} \quad (3)$$

Onde $\bar{T}$ é a temperatura média dada em (°C).

Existe uma grande dificuldade na otimização do valor de ZT , visto que o aumento do coeficiente Seebeck leva a diminuição da condutividade elétrica e o aumento da condutividade elétrica leva a um comparável aumento na condutividade térmica.

Todas as propriedades da figura de mérito (ZT), coeficiente de Seebeck, condutividade térmica e elétrica dependem da concentração de portador de carga de uma forma conflitante, conforme ilustrado na Figura 8. Atingir uma elevada ZT em um material, tipicamente requer a otimização da concentração de portador de carga dos semicondutores.

Figura 8 - Variação de S , σ , κ e ZT em função da concentração de portadores



FONTE: Adaptado de Almeida, 2015

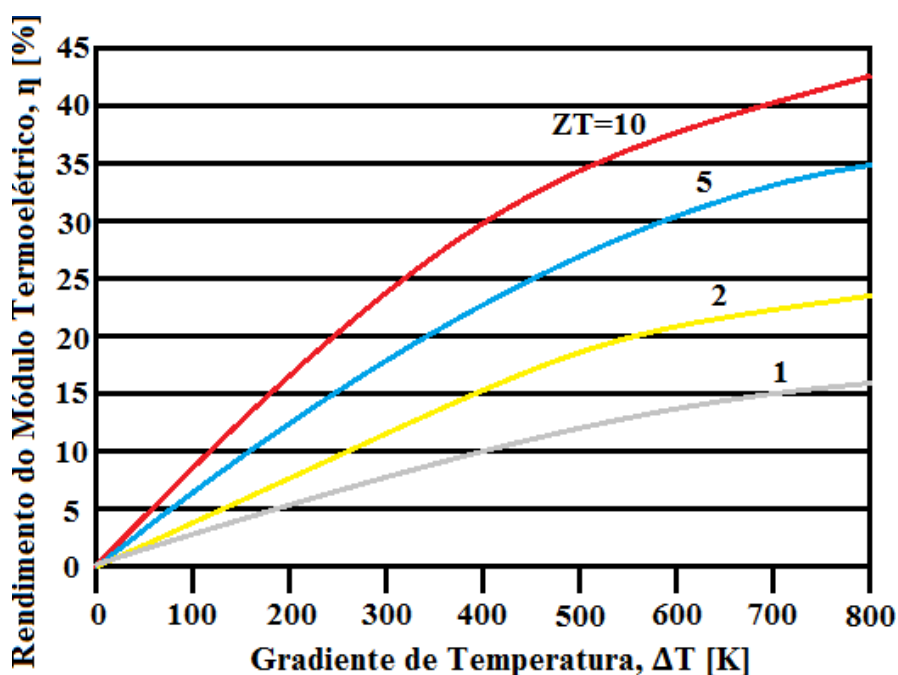
A eficiência máxima η de um TEG é determinada pela eficiência de Carnot multiplicada pela eficiência termoeétrica (TE) adiabática que é uma função de ZT , resultando na equação 4.

$$\eta = \left(\frac{t_q - t_f}{t_q} \right) \frac{(\sqrt{1 + ZT} - 1)}{(\sqrt{1 + ZT}) \frac{t_q}{t_f}} \quad (4)$$

Em que T_h é a temperatura do lado quente e T_c é a temperatura do lado frio (INCROPERA, et al., 2008).

A Figura 9 mostra a relação da Figura de mérito (ZT) com a eficiência do módulo (η), onde nota-se que a eficiência está diretamente ligada a figura de mérito. Se existissem materiais com uma Figura de Mérito (ZT) igual a 10, seria possível obter-se um rendimento do módulo termoeletrico (η) da ordem de 25% com 300K de gradiente de temperatura. Atualmente os módulos termoeletricos convencionais para a geração de energia possuem figura de mérito próxima a 1 (BORBA, 2019).

Figura 9 - Eficiência do Módulo em função de ZT para diferentes temperaturas



Fonte: Almeida, 2015

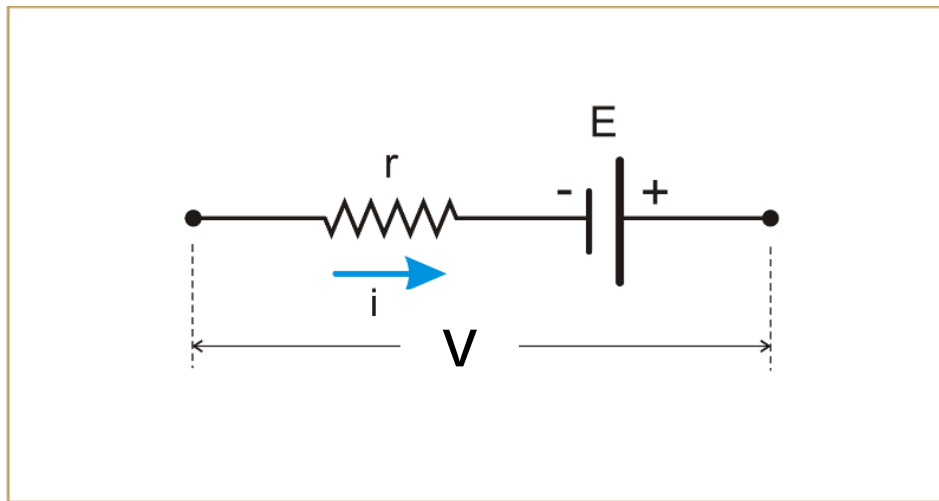
2.6 Princípios dos geradores elétricos

Por definição, geradores elétricos são dispositivos que convertem diferentes formas de energia, como energia química, solar, mecânica em energia elétrica.

Os geradores elétricos reais possuem uma resistência elétrica interna conforme ilustrado na Figura 10, a partir deste fato pode-se constatar que nem

toda a energia produzida pelo gerador estará disponível para a sua utilização, uma vez que existe uma perda de potência associada à sua resistência interna.

Figura 10 - Gerador elétrico real



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

A equação do gerador relaciona três grandezas: tensão útil (V), força eletromotriz (E) e tensão dissipada ($r \cdot I$), todas medidas estas medidas são em volt (V) cuja relação é dada pela equação 5.

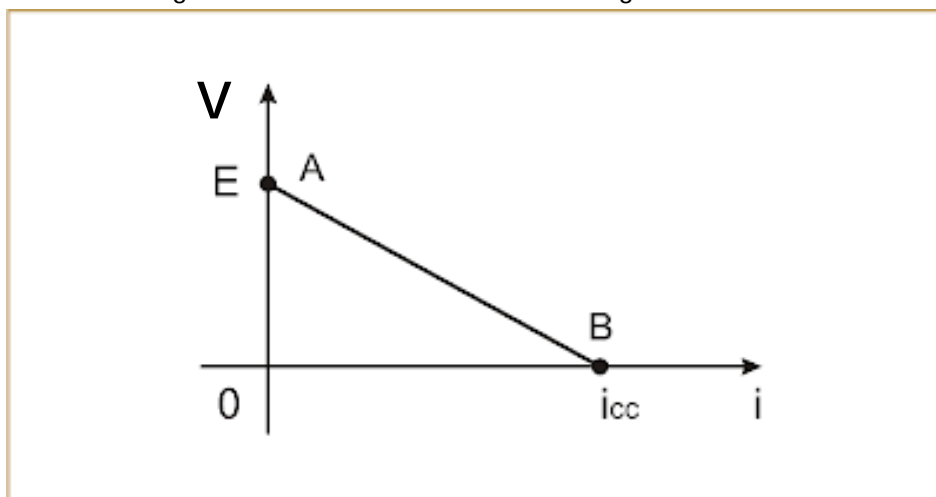
$$V = E - r \cdot I \quad (5)$$

Um gerador está em circuito aberto quando não alimenta nenhum circuito elétrico externo. Nestas condições não passa corrente elétrica pelo gerador ($i = 0$) e a forma da equação característica do gerador é dada pela equação 6.

$$V = E \quad (6)$$

A partir destas equações fica possível determinar a curva característica de um gerador no gráfico Tensão vs Corrente onde mostra a variação da tensão com o aumento da corrente ilustrada na Figura 11.

Figura 11 – Curva característica de um gerador elétrico



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

A força eletromotriz (E) refere-se ao valor máximo que este dispositivo pode gerar, porém tal valor só é obtido quando o gerador está desconectado do circuito, de modo que nenhuma energia seja dissipada pela passagem de corrente elétrica.

Um gerador é considerado em curto-circuito quando está ligado a um fio condutor de resistência nula. Nestas condições, a tensão entre os polos do gerador é igual a zero (equação 7), e a corrente elétrica que percorre o gerador é denominada corrente de curto-circuito (I_{cc}) dada pela equação 8.

$$0 = E - r \cdot I_{cc} \quad (7)$$

$$I_{cc} = \frac{E}{r} \quad (8)$$

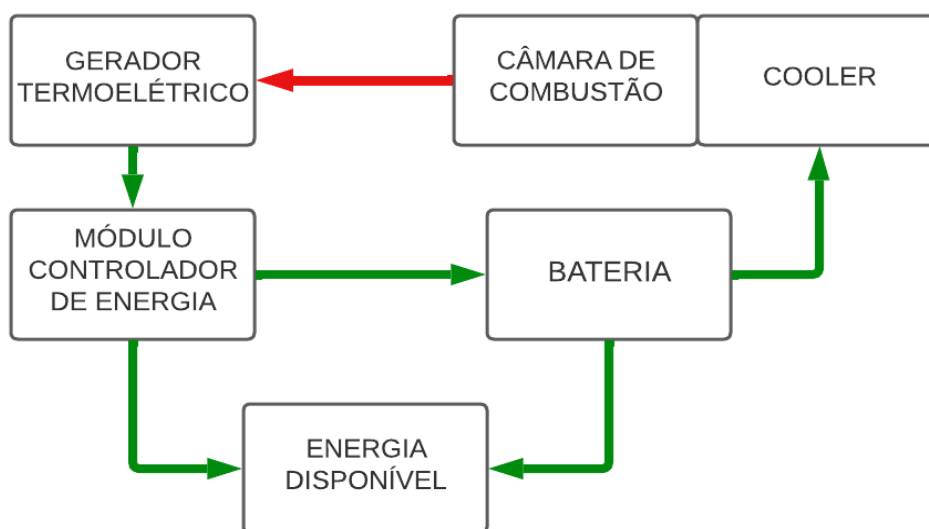
O gráfico que apresenta a dependência da tensão nos terminais do gerador e a corrente elétrica que percorre o circuito é chamado, portanto, de curva característica do gerador, e permite verificar que quanto maior a intensidade da corrente no gerador, menor é a tensão entre seus terminais.

2.7 Geradores termoeletricos aplicados em processos de cogeraçao de energia em fornos de biomassa

O gerador termoeletrico conectado a um fogao de biomassa é composto basicamente por três partes: a câmara de combustão, o sistema do gerador termoeletrico e o sistema de carga, conforme mostrado na Figura 12 em que cada subsistema e o fluxo de energia entre cada um deles é indicado pelas setas laranjas.

Conforme o combustivel de biomassa queima no fogao, parte da energia flui para o TEG e é convertida em eletricidade. Em seguida, a eletricidade é conduzida para o sistema de controle, que é projetado para colher o máximo de energia proveniente do TEG. Por fim, a energia é armazenada em uma bateria, onde pode ser empregada para alimentar um dispositivo eletrônico via USB. Além disso, a eletricidade produzida pelo gerador termoeletrico pode alimentar o ventilador, o que otimiza a relação combustivel/ar para melhorar a liberação de calor e reduzir as emissões de material particulado do fogao (GARZON, 2012).

Figura 12 - Diagrama de composição básica de um fogao de biomassa

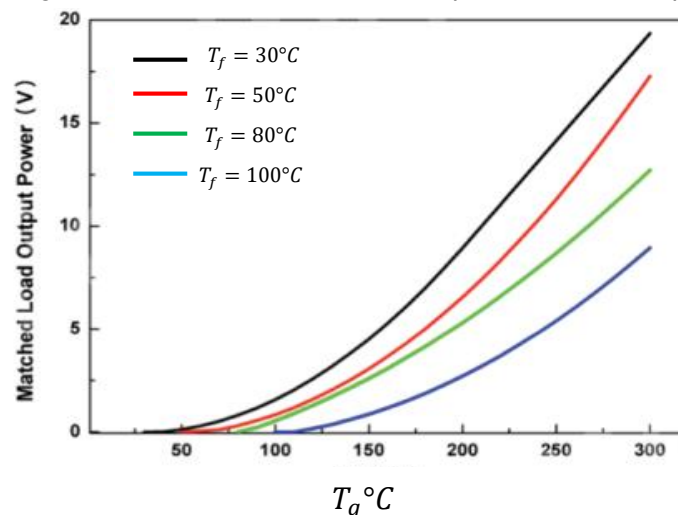


FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Os módulos disponíveis comercialmente têm uma eficiência máxima de 5 a 6%, enquanto a eficiência de de módulos termoeletricos em escala laboratorial já é superior a 10% (BORBA, 2019).

Em processos de cogeração termoeletrica em fogões de biomassa essa eficiência só é obtida a partir de dois fatores principais: a eficiência dos TEG's, dada pela equação 4, e pela diferença de temperatura entre as suas extremidades (ALMEIDA, 2015). Além destes dois parâmetros, apenas a temperatura da fonte fria T_f é também bastante relevante, pois conforme mostra a figura 13, ao manter-se constante a temperatura quente T_q , a diminuição da temperatura fria promove um ganho de potência de saída do TEG. (B.I. ISMAIL, W.H. AHMED, 2009).

Figura 13 - Potência de saída vs temperatura da fonte quente



FONTE: Adaptado do Datasheet TEGPRO modelo TGMT-19W-4V, 2017. Influência da temperatura da fonte fria (T_c) na potência de saída.

Portanto, as próximas seções focaram nos estudos que dizem respeito às propriedades do módulo termoeletrico quando relacionadas com a temperatura da fonte fria, abordando diferentes alternativas de designer em sistemas de resfriamento dos TEGs, que são fundamentais para seu bom desempenho.

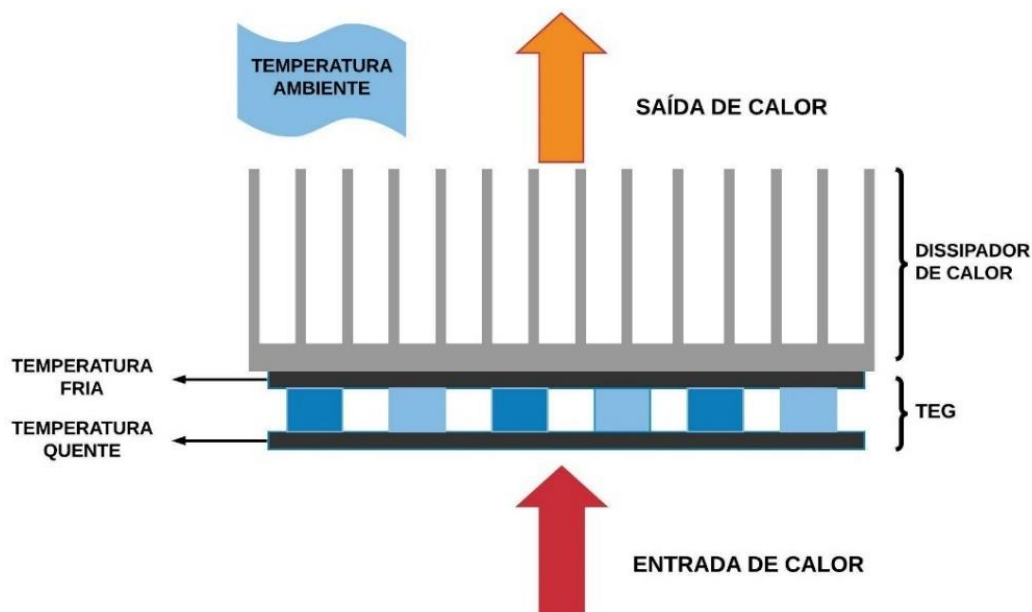
Três conceitos de projetos para resfriar o módulo termoeletrico utilizados em fogões de biomassa são discutidos no decorrer desta seção e são eles:

- Convecção natural resfriada a ar
- Convecção forçada resfriada a ar
- Convecção natural resfriada por água

2.7.1 Convecção natural resfriada a ar

O sistema de convecção natural resfriado a ar é impulsionado pela mudança de temperatura do ar, resultando em movimentos convectivos de ar dentro de um dissipador de calor. Este sistema é ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Sistema de resfriamento por convecção natural do ar



FONTE: Adaptado de Lertsatitthanakorn, 2007

(LERTSATITTHANAKORN, 2007), adicionou um módulo termelétrico de geração de energia (TEG) à parede lateral do fogão e criou um sistema gerador termoelétrico de fogão de biomassa utilizando-se do calor residual do fogão para a geração de energia conforme ilustra a Figura 15.

O sistema é composto por um módulo TEG, uma parede de metal da estrutura do fogão serve como o lado quente e um dissipador de calor de aleta retangular resfriado a ar por convecção livre no lado frio do Módulo TE. O autor obteve aproximadamente 2,4 W na diferença de temperatura de 150 °C.

Figura 15 - Fogão de biomassa resfriado por convecção natural do ar

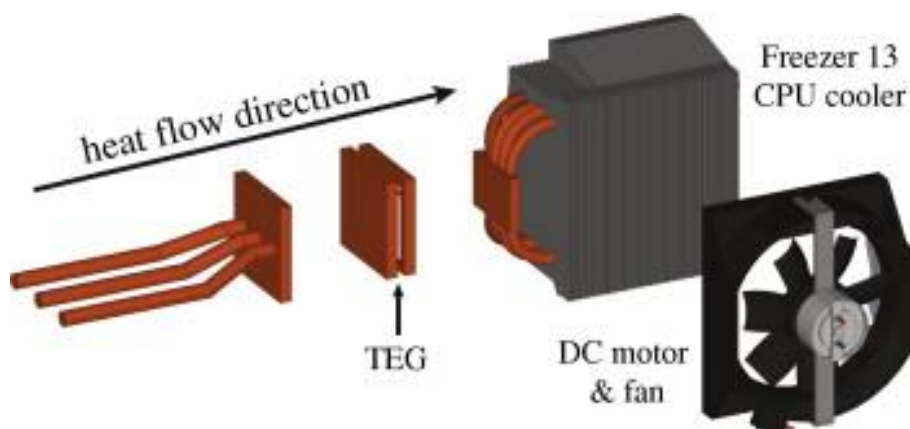


FONTE: Lertsatitthanakorn, 2007

2.7.2 Convecção forçada resfriada a ar

A convecção forçada resfriada a ar é a técnica em que o dissipador de calor frio do gerador termoeletrico é resfriado por ar de fornecido por um ventilador ou Cooler de refrigeração, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Arranjo de um sistema de convecção forçada a ar



Fonte: Lertsatitthanakorn, 2007

A Royal Philips Electronics da Holanda testou o fogão Philips modelo HD4010 ilustrado na Figura 17 equipado com um TEG no fundo do fogão e resfriado por um ventilador.

A bateria fornece energia elétrica para o ventilador, e o gerador termoeletrico recarrega a bateria e alimenta o ventilador quando o fogão está quente. O fluxo de ar fornecido pelo ventilador é pré-aquecido antes de ser injetado na câmara de combustão. Desta forma obteve-se uma combustão completa e sem fumaça através da injeção de oxigênio na câmara de combustão.

Figura 17 - Fogão de biomassa da Royal Philips Electronics



Fonte: Datasheet do fogão da Royal Philips Electronics

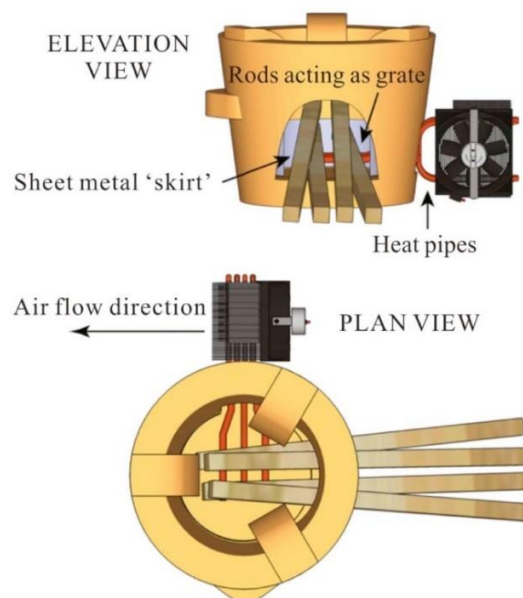
O Rochester Institute of Technology (RIT) projetou um módulo termelétrico para ser acoplado a um fogão existente (Figura 18 e Figura 19). Um gerador termoeletrico (TEG) foi empregado para captar energia utilizando a diferença de temperatura entre a câmara de combustão por meio de uma haste de aço e o dissipador de calor resfriado por um ventilador (MASTBERGEN, 2005).

Figura 18 - Fogão de biomassa da Rochester Institute of Technology (RIT)



Fonte: Datasheet do fogão Rochester Institute of Technology (RIT)

Figura 19 - Ilustração da visão em perspectiva frontal e superior do Fogão de biomassa da Rochester Institute of Technology (RIT)



Fonte: Datasheet do fogão Rochester Institute of Technology (RIT)

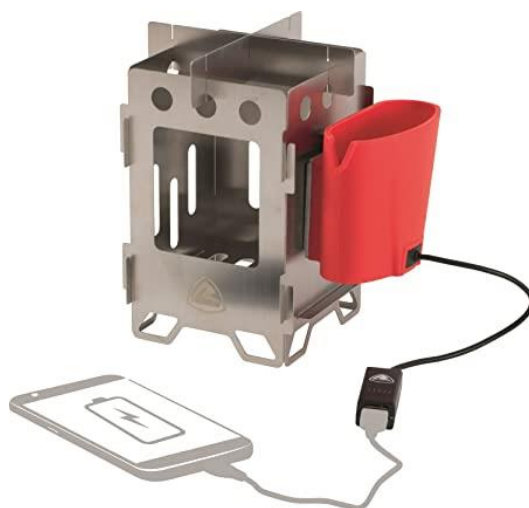
Na maioria dos projetos anteriores, o gerador termoelétrico na base do fogão é usado para fornecer eletricidade para um possível carregamento auxiliar e melhorar a eficiência da combustão por meio de um ventilador. As vantagens desse sistema são que ele requer o mínimo de peças e valores de temperaturas baixos podem ser obtidas no dissipador de calor frio.

2.7.3 Convecção natural resfriada a água

A convecção natural resfriada a água tem atraído muita atenção devido ao seu melhor desempenho em resfriar a fonte fria. A empresa Roben Woodsman desenvolveu um projeto aprimorado do fogão de biomassa em que os geradores termoelétricos foram acomodados na lateral da câmara de combustão utilizada para cozinhar, no lado oposto, um tanque de água em contato com dissipadores de calor foi utilizado como um trocador de calor do lado frio. Na investigação experimental, um queimador a gás foi utilizado para simular a fonte de calor e uma caixa d'água foi utilizada como fonte de refrigeração para geradores termoelétricos. Resultados experimentais mostraram que a uma diferença de temperatura de 190 °C, a potência máxima de saída de dois geradores termoelétricos é 2,5 W.

O fogão foi desenvolvido pela empresa Roben Woodsman ilustrado na Figura 20 foi projetado como equipamento para aventuras ao ar livre, coletando calor por meio de uma haste de metal inserida no interior da câmara de combustão para receber o calor e transferi-lo para o módulo de TEG, o lado frio do TEG é conectado a um dissipador de calor refrigerado a água.

Figura 20– Fogão de biomassa da Roben woodsman



FONTE: Fonte: Datasheet Roben woodsman, 2022

3. Metodologia

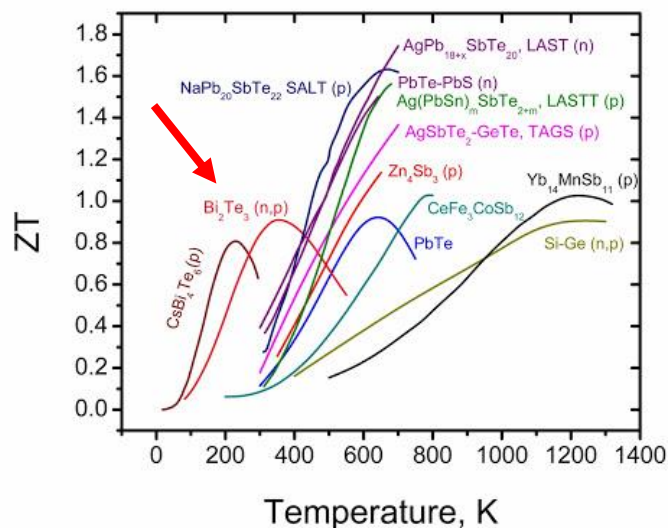
Este capítulo destina-se a explicação detalhada da metodologia utilizada na elaboração dos ensaios experimentais e na construção do protótipo de aplicação.

3.1 Escolha de um gerador termoeétrico (TEG)

A primeira decisão na elaboração do projeto envolve escolher um TEG comercial para a análise de seu desempenho, afim de se mensurar sua capacidade de atender as especificações das condições de operação do protótipo, que é delimitada pela temperatura de combustão da madeira, algo em torno de 300°C (SOARES, 2018).

A Figura 21 foi usada como referência para se escolher o semiconductor ideal, pois ela representa a eficiência de alguns materiais termoeétricos em função de diferentes faixas de temperaturas. Além disso o custo do TEG, bem como sua disponibilidade no mercado também foram utilizados como critério para a sua escolha.

Figura 21 – Desempenho de materiais semicondutores em diferentes temperaturas



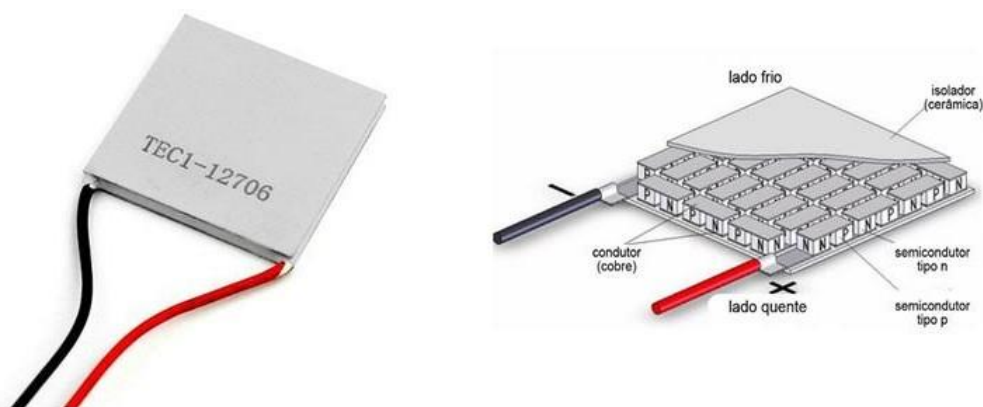
FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

A partir da análise do gráfico na Figura 21, nota-se que o Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3) é o material termoelétrico ideal para a construção do protótipo proposto neste trabalho, uma vez que seu desempenho máximo expresso pela figura de mérito (ZT) localiza-se em uma faixa de temperatura possível para se trabalhar em escala laboratorial e próxima a temperatura de aplicação do protótipo.

Para a caracterização e construção do protótipo utilizou-se o módulo TEG II-VI Marlow Industries Inc., modelo TG 12-8, que é construído com o Telureto de Bismuto (Bi_2Te_3) e possui sua aplicação indicada para a geração de energia. O módulo utilizado para a construção da fonte fria foi o TEC1-12706 da empresa Hebei I.T. (Shanghai), que possui sua aplicação indicada para a refrigeração. A seguir tem-se uma explicação em maiores detalhes para diferenciar cada modelo em relação a sua aplicação.

- Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd, modelo TEC1-12706 que é constituído por vários pares de semicondutores de telureto de bismuto do tipo-p e do tipo-n ligados em série e colados entre duas placas cerâmicas constituídas de óxido de alumínio (Figura 22).
- II-VI Marlow Industries Inc., modelo TG 12-8. A Marlow Industries desenvolve e fabrica módulos termoelétricos dentre outros sistemas de valor agregado para os mercados aeroespacial, de defesa, médico, industrial, automotivo, de geração de energia e telecomunicações (Figura 23).

Figura 22 - Módulo termoelétrico TEC-12706



Fonte: Martins, 2007

A diferença entre os módulos TEC-12706 e o TG 12-8 é exatamente sua aplicação. Enquanto TEC-12706 é um representante da categoria de módulos termoeletricos utilizados para refrigeração, utilizando-se do efeito Peltier para este fim, o TG 12-8 faz parte da nova geração destes dispositivos, uma vez que é indicado exclusivamente para a geração de energia, em que o efeito Seebeck é o fenômeno físico que se manifestará. A Figura 23 apresenta o modelo TG 12-8.

Figura 23 - Módulo termoeletrico TG 12-8 L



Fonte: Datasheet II-VI Marlow Industries Inc.

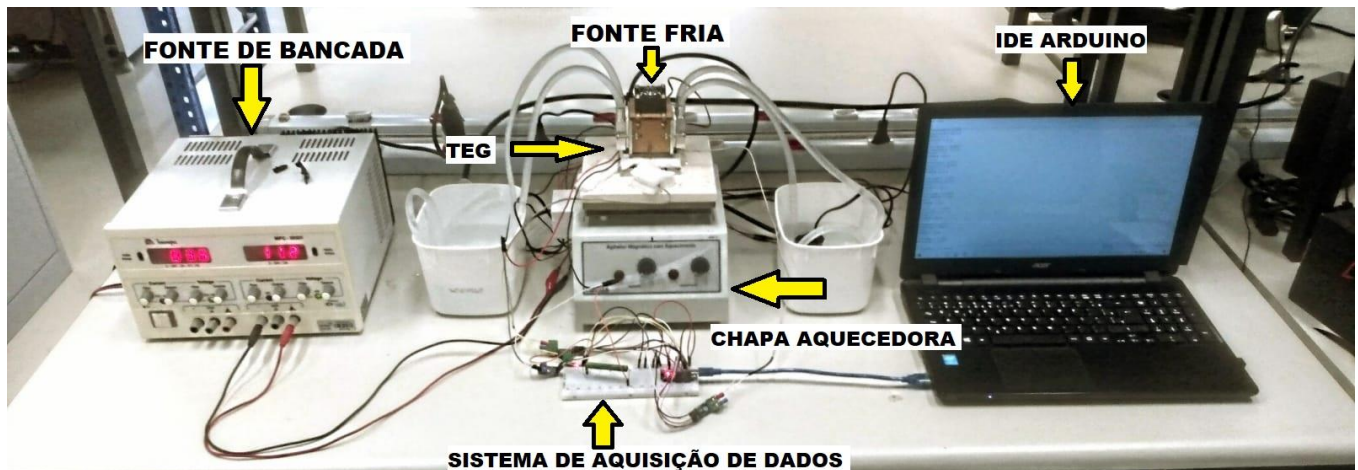
3.2 Bancada experimental e a caracterização de módulos termoeletricos

Após a escolha do TEG TG 12-8 a ser estudado e no intuito de se comprovar a sua eficácia na captação de energias térmicas residuais, foi necessária a construção de um aparato experimental afim de se realizar sua caracterização e se obter as curvas de desempenho do módulo termoeletrico.

A bancada experimental construída, mostrada na Figura 24, é composta por um notebook Dell, uma chapa aquecedora Cienlab modelo CE-200/P1, dois blocos de alumínio utilizados para instalar o TEG, um módulo termoeletrico TG 12-8, um refrigerador de ar arrefecido por água, um sistema de aquisição de dados construídos pelo autor com a plataforma de prototipagem arduino, dois reservatórios de água de 2 Litros, duas bombas de água submersas e uma fonte de bancada Minipa modelo MPS 3005B.

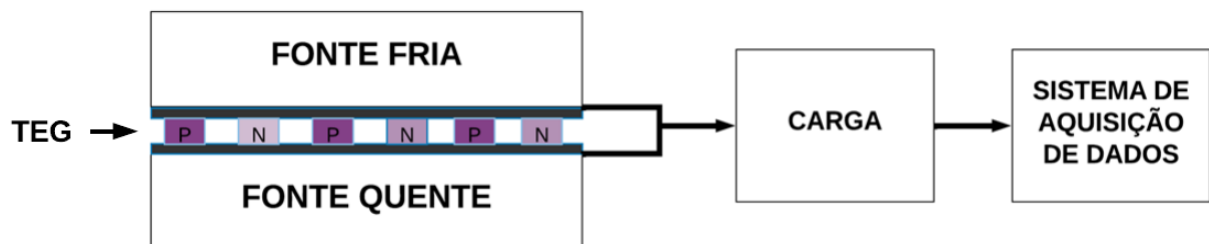
Para um melhor entendimento do funcionamento da bancada, um diagrama esquemático e simplificado é apresentado na Figura 25, e será descrito ao longo deste capítulo o funcionamento detalhado de cada equipamento utilizado, também será apresentado informações técnicas e especificações de cada componente utilizado

Figura 24 - Bancada experimental



FONTE : Elaborada pelo autor, 2022

Figura 25– Diagrama de Blocos do aparato experimental



Fonte: elaborado pelo autor, 2022

Conforme pode ser visto na Figura 25 a bancada experimental é composta pelos seguintes componentes principais:

1. **Fonte Quente:** Sistema de transferência de calor responsável por fornecer energia térmica para o interior do módulo termoeletrico;
2. **Fonte Fria:** composta por um sistema refrigeração responsável por manter o gradiente de temperatura entre as faces do módulo termoeletrico;
3. **Módulo termoeletrico:** Dispositivo alocado na interface da fonte quente e fria, responsável pela produção de potência elétrica proporcional induzida pela diferença de temperatura em suas faces.
4. **Carga e sistema de aquisição de dados:** Foi realizada uma programação no IDE Arduino de forma que fosse possível obter e armazenar, através dos sensores do sistema de aquisição de dados, os parâmetros de corrente e tensão através da comutação das cargas resistivas, e também das temperaturas do sistema.

3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA BANCADA EXPERIMENTAL

Conforme relatado, o efeito Seebeck se manifesta em um TEG quando este é exposto a um gradiente de temperatura, sendo uma das faces exposta à uma elevada e a outra à uma temperatura mais baixa. O fluxo de calor resultante que atravessa o módulo TEG induz o surgimento de uma corrente elétrica. A bancada de teste consiste em fornecer uma fonte de temperatura fria e outra de temperatura quente. Na interface dessas duas fontes de temperaturas os módulos foram inseridos e com o auxílio de sistema de aquisição de dados, a temperatura quente (T_q), temperatura fria (T_f), corrente e tensão foram obtidos.

A fonte fria utilizada é um refrigerador termoeletrico, constituído por duas pastilhas Peltier modelo TEC 12706. Este dispositivo através de alimentação controlada e adequada possui a capacidade de absorver calor em uma de suas faces (refrigeração) e ejetar calor em outra face (aquecimento), atuando como um refrigerador ou aquecedor termoeletrico. As especificações do módulo peltier estão descritas a seguir:

– Modelo: TEC1-12706

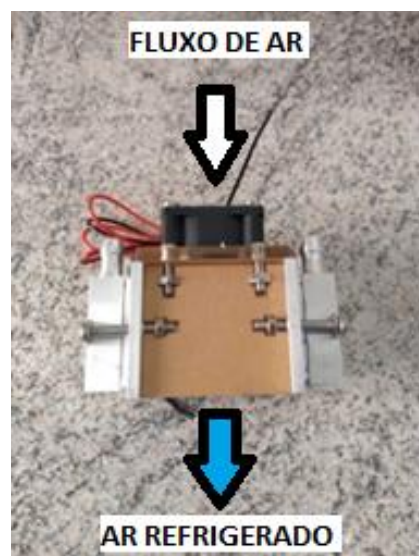
- Faixa de temperatura: -30 a 70 Celsius
- Tensão de operação: 0-15,2VDC
- Corrente de operação: 0-6A
- Potência máxima: 60W
- Dimensões: 40 x 40mm

Nesta aplicação ao ligar o módulo Peltier junto à fonte de alimentação deve-se observar que a superfície em contato com o dissipador de alumínio irá resfriar, logo a face fria com auxílio do ventilador será responsável pelo estabelecimento de um fluxo de ar refrigerado, portanto a refrigeração da bancada experimental se dá através da convecção do ar frio sobre a superfície do módulo TEG.

Importante ressaltar que para poder realizar o processo de refrigeração de forma satisfatória, recomenda-se a aplicação de um elemento dissipador de calor bastante eficiente no verso do módulo Peltier, que será justamente o lado que irá aquecer. Optou-se para esta finalidade, o uso de um radiador arrefecido por água.

Os sistemas de resfriamento termoelétricos têm vantagens sobre os dispositivos de resfriamento convencionais que utilizam fluidos refrigerantes como: tamanho compacto, peso leve, sem partes mecânicas móveis e sem. A fonte fria utilizada neste trabalho é apresentada pela Figura 26. As peças que a compõe estão ilustradas na Figura 27.

Figura 26 - Fonte fria



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Figura 27 – Materiais utilizados na construção da fonte fria



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Para o controle da fonte fria que deve ser mantida em uma temperatura constante durante a execução dos ensaios laboratoriais, um controlador de temperatura foi utilizado para se estabelecer um valor de setpoint do refrigerador. A Figura 28 representa o controlador CFACIL, MODELO W3002 que foi utilizado neste trabalho.

Ao finalizar a montagem da fonte fria efetuou-se uma avaliação de seu funcionamento no intuito de validar sua operação. O teste foi realizado sob as seguintes condições de operações:

- Alimentação do sistema através da fonte: 12,0V.
- Temperatura ambiente: 26°C
- O teste teve duração de 10 minutos, tempo este necessário para que a temperatura se estabilizasse em seu menor valor
- A coleta de dados foi realizada no intervalo de 30 segundos através sistema de aquisição de dados, utilizando-se do sensor de temperatura MAX471.

Os resultados obtidos durante a avaliação do desempenho da fonte fria é discutido no capítulo 4.

Figura 28 - Controlador de temperatura



FONTE: Datasheet do fabricante, 2022

A seguir estão descritas as características técnicas do controlador de temperatura CFACIL, MODELO W3002 utilizado:

Modelo: W3002

Faixa de temperatura: -50 ~ 110°C

Resolução medição/configuração setpoint: 0.1°C

Precisão de medição: $\pm 0.2^\circ\text{C}$

Tensão de entrada: CC 12V

Tensão de Saída: CC 12V

A fonte quente foi uma chapa aquecedora da Cienlab CE-200/P1, mostrada pela Figura 29, e possui capacidade de atingir 350 °C (Figura 29).

Por fim, o módulo TEG foi posicionado entre a fonte quente e a fonte fria, conectado a ele um sistema de aquisição de dados que realiza a medição e armazenamento de todos os parâmetros necessários para sua caracterização.

Figura 29 - Fonte Quente – Chapa Aquecedora Cienlab



Fonte: Datasheet do fabricante, 2021

3.4 Construção do sistema de aquisição de dados

A aquisição de dados, ou DAQ, como é frequentemente referido, é o processo de digitalização de dados ou parâmetros físicos para que possam ser exibidos, analisados e armazenados em um computador. Um exemplo simples é o processo de medição da temperatura em uma sala como um valor digital usando um sensor como um termopar.

Os sistemas modernos de aquisição de dados podem incluir a adição de software de análise e relatório de dados, conectividade de rede e opções de controle e monitoramento remoto. Todos os sistemas de aquisição de dados consistem em três elementos essenciais – Sensor, Condicionamento de Sinal e Conversor Analógico-Digital (ADC).

No centro de todos os sistemas de aquisição de dados está um conversor analógico para digital (ADC). Como o nome indica, este dispositivo adquire os dados do ambiente e os converte em níveis discretos que podem ser interpretados por um processador.

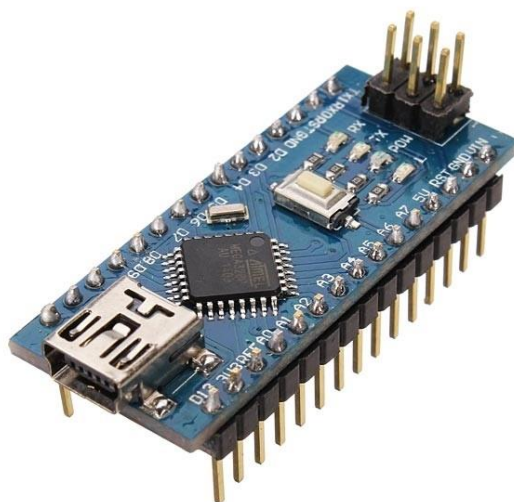
Quanto maior o número de “bits” de um ADC (12 bits, 16 bits, 18 bits etc.), maior o número de níveis discretos que podem representar um sinal analógico e maior a resolução do ADC.

Os sensores geralmente chamados de transdutores, convertem grandezas físicas como temperatura, força e movimento em sinais de tensão ou corrente que podem ser usados como entradas para o ADC.

Ao escolher o sensor certo para o sistema de medição, é importante considerar fatores como a precisão do sensor e o condicionamento do sinal necessário para registrar um sinal legível.

Para este projeto, escolheu-se como Hardware a plataforma conhecida como Arduino, que tem como objetivo principal tornar o acesso à prototipagem eletrônica mais fácil, mais barata e flexível. O modelo utilizado foi Arduino Nano, Figura 30, sendo a versão escolhida por ser a menor e mais completa das placas de microcontroladores ATmega, (VIDAL, 2018).

Figura 30 - Arduino Nano



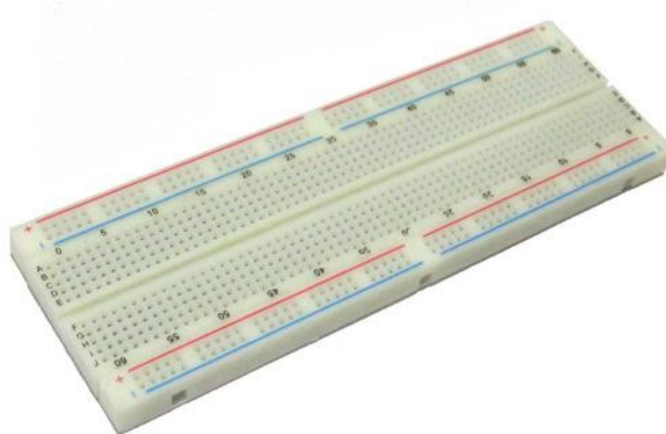
FONTE: Datasheet do fabricante, 2022

Os sensores utilizados para comporem a plataforma de hardware foram o sensor de temperatura MAX471, o de corrente ACS712 e o de tensão DC 0-25V. Também foi utilizada uma placa protoboard necessária para a conexão dos resistores de potência.

3.4.1 Placa protoboard

A Figura 31 ilustra a placa protoboard, que possui conexões condutoras em linhas verticais e horizontais para a montagem de circuitos elétricos experimentais. Sua utilização tem a vantagem de dispensar a soldagem dos fios e de outros componentes.

Figura 31 – Placa Protoboard



FONTE: Datasheet do fabricante, 2022

A seguir são apresentadas suas principais características:

- Faixa de Temperatura: -20 a 80°C
- Terminais e condutores de 0,3 a 0,8 mm
- Dimensões: 165mm x 57mm x 10mm

3.4.2 Resistor de potência

Resistor é um componente dos mais utilizados na eletrônica e em circuitos elétricos, a Figura 32 o representa. Este dispositivo tem a finalidade de limitar ou diminuir a corrente elétrica, tensão e consequentemente a potência em alguma parte de um circuito eletrônico, conforme a necessidade do projeto.

Figura 32 - Resistor de potência



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

A seguir são apresentadas suas principais características dos resistores usados neste trabalho.

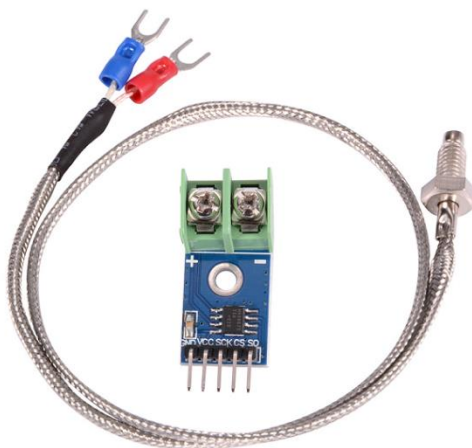
- Potência nominal: 20 W
- Resistência: Utilizou-se neste trabalho resistores de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 Ω
- Material: Metal, Cerâmica
- Tamanho do corpo: 7 x 40 mm (D * L)
- Comprimento total: 100 mm

3.4.3 Sensor de temperatura MAX6675 com termopar tipo K

Termopar é um tipo de sensor que tem como finalidade medir temperaturas. Este tipo de sensor é conhecido por ser versátil, simples, de baixo custo e robusto. Pode ser utilizado em aplicações industriais, em aparelhos eletrônicos ou em projetos pessoais. Sua composição é feita a partir de dois metais distintos que são unidos e ligados a um dispositivo que tenha capacidade de medir diferenças de potenciais (VIDAL, 2018).

O Módulo MAX6675 Termopar Tipo K – 0° a 800°C representado pela Figura 33, é um dispositivo eletrônico utilizado neste trabalho.

Figura 33 – Sensor de temperatura MAX6675



FONTE: Datasheet do fabricante, 2022

A sonda que faz parte do Módulo MAX6675 Termopar Tipo K – 0° a 800°C é toda revestida em aço inoxidável e a ponta possui blindagem. Esta forma de construção do termopar permite que o mesmo possa ser utilizado em temperaturas mais altas.

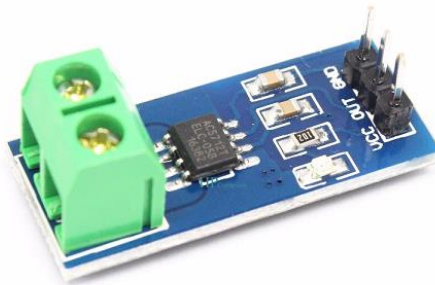
A seguir são apresentadas as principais características deste termopar:

- Tensão de operação: 3 a 5,5VDC
- Corrente de operação: 50mA
- Faixa de medição: 0 a 800° celsius
- Precisão: $\pm 1,5^{\circ}$ C
- Resolução de temperatura de: 0,1° C

3.4.4 Sensor de corrente ACS712

O Sensor de Corrente (AC e DC) ACS712, mostrado na Figura 34 possibilita realizar a leitura de corrente alternada (AC) e contínua (DC). Este sensor utiliza efeito hall para fazer a detecção do campo magnético que é gerado pela passagem da corrente, e no pino de saída do mesmo é identificado uma tensão proporcional à entrada. Os terminais de ligação são totalmente isolados da saída do MCU (microcontrolador).

Figura 34 – Sensor de corrente ACS712



FONTE: Datasheet do fabricante, 2022

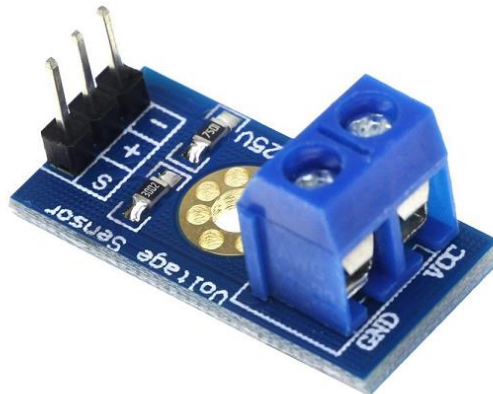
A seguir são apresentadas as principais características deste sensor de corrente:

- Tensão de operação: 5VDC
- Faixa de medição: -30A a +30A
- Tempo de resposta: 5 μ s
- Saída analógica proporcional: 185mV/A

3.4.5 Sensor de tensão 0-25V

O Sensor Medidor de Tensão DC 0-25V apresentado na Figura 35, tem seu princípio de funcionamento baseado nos divisores de tensão para mensurar a tensão percorrida sobre seus resistores. A resolução do ADC (conversor analógico digital) do Arduino é de 10 bits, logo, a resolução do sensor de tensão é de 0,00489V (5V / 1023).

Figura 35 - Senso de tensão 0-25 V



FONTE: Datasheet do fabricante, 2022

A seguir são apresentadas as principais características deste sensor de tensão:

- Tensão de entrada: 0 a 25V
- Resolução analógica: 0,00489VDC
- Proporção de divisão: 5:1
- Tolerância do resistor: 1%

3.4.6 Programação, montagem e validação do sistema de aquisição de dados

A programação para viabilizar a atuação dos sensores foi desenvolvida no software contido na interface de desenvolvimento do Arduino (IDE) e está disponível no Anexo A deste trabalho. De modo simplificado quando o sistema de aquisição de dados é inicializado, o algoritmo aciona os sensores, captura os dados medidos, imprime na tela e os armazena para serem tratados posteriormente.

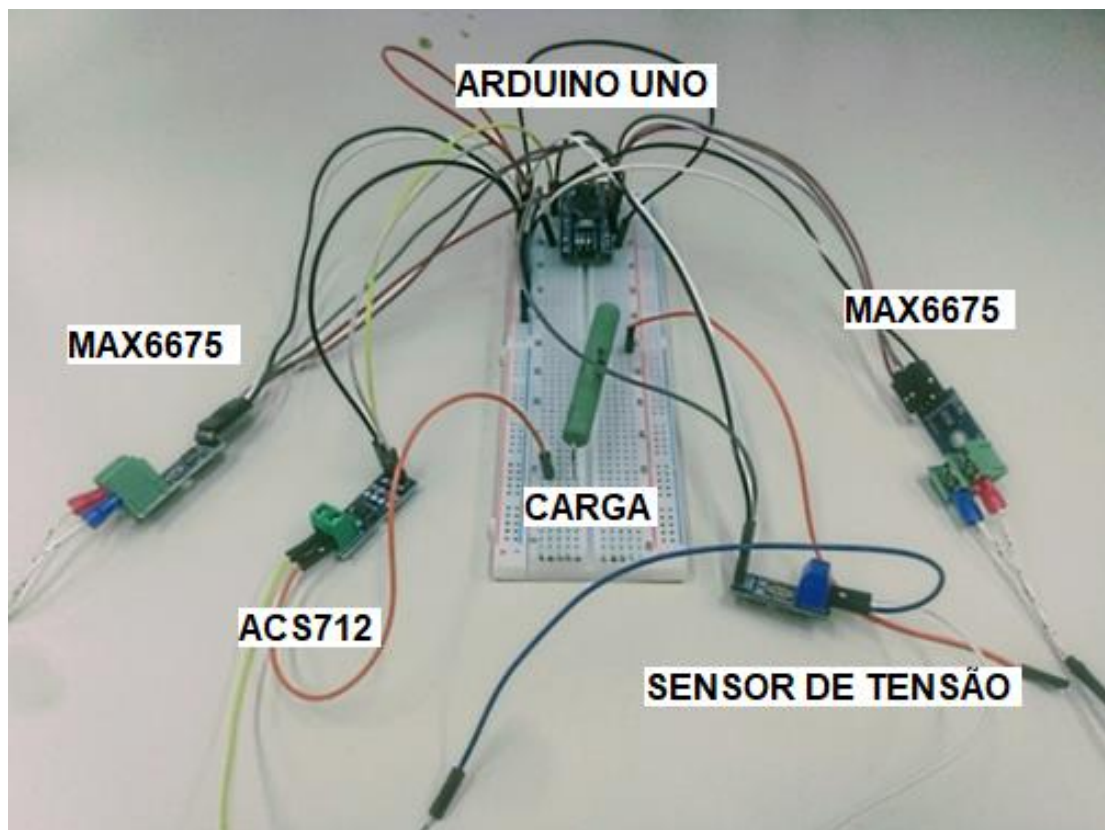
O sistema de aquisição construído no presente trabalho pode ser observado na Figura 36, e permite a substituição dos resistores de potência de 25W com seus valores resistivos variando numa faixa entre 0 e 100 ohms. Além

dos resistores o sistema contém também uma placa protoboard, um Arduino Nano além de um sensor de corrente ACS712, um sensor tensão 0-25V, e dois sensores de temperatura MAX471 e dois termopares do tipo K.

O princípio de funcionamento consiste na comutação de cargas resistivas às quais é aplicada a potência elétrica do módulo TEG, permitindo então que se obtivesse a sua curva característica. Para isso, foi realizada a programação no IDE Arduino, sendo o algoritmo responsável pela aferição e armazenamento dos valores de tensão e corrente produzidos pelo módulo termoeletrico, bem como as temperaturas em que estava exposto no momento.

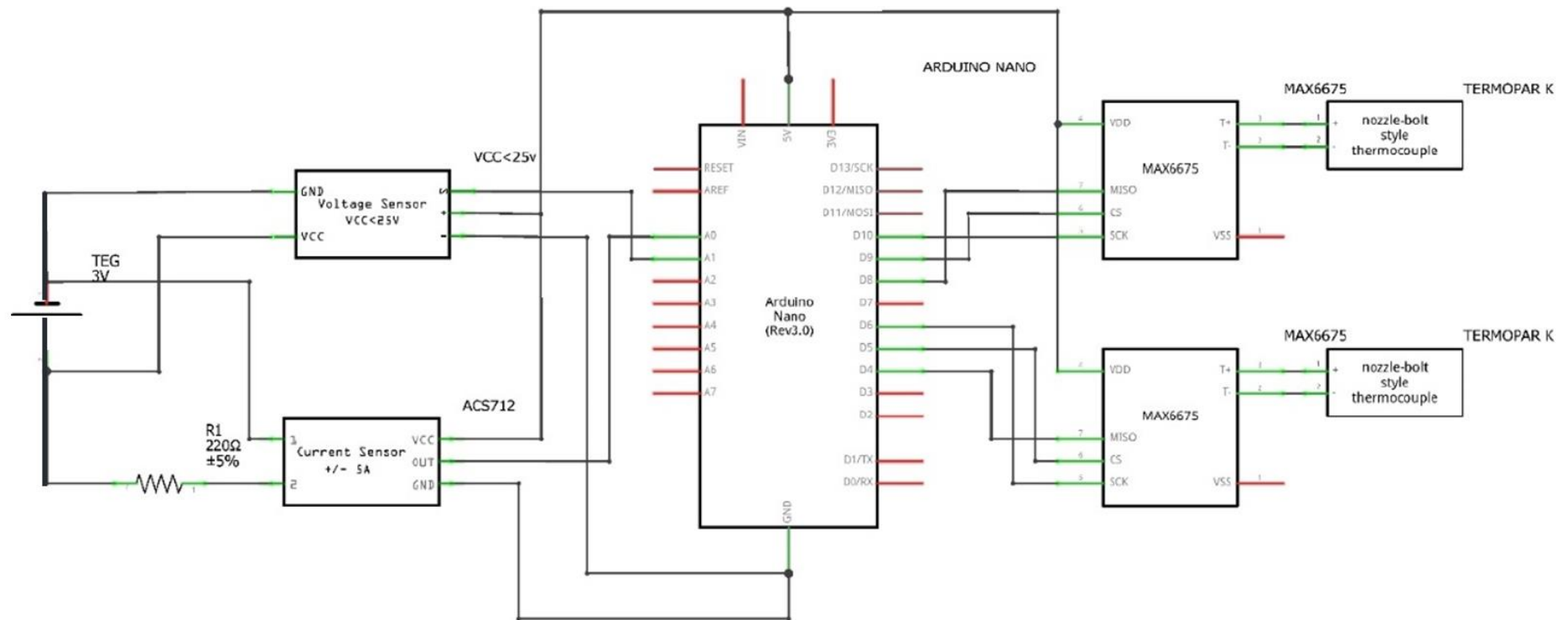
A Figura 37 apresenta um esquema resumido das ligações realizadas entre o Arduino nano utilizado, os sensores e o resistor. O gerador termoeletrico foi ligado em série com o sensor de corrente e o resistor de potência, e em paralelo com o sensor de tensão.

Figura 36 - Sistema de aquisição de dados



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Figura 37 - Diagrama esquemático das ligações realizadas para a construção do sistema de aquisição de dados



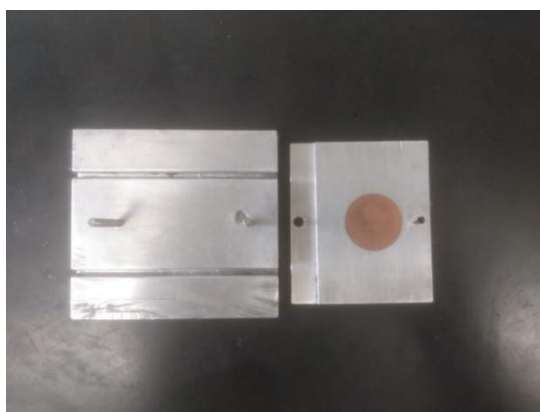
fritzing

FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

3.4.7 Preparação do módulo termoeétrico para a instalação na bancada experimental

Esta seção descreve os passos para se realizar a montagem do aparato que permite a alocação do módulo termoeétrico na interface entre a fonte quente e fria. Primeiramente foi construído um suporte para se acomodar o módulo TEG que pode ser observada na Figura 38.

Figura 38 - Suportes de alumínio para a instalação do módulo TEG

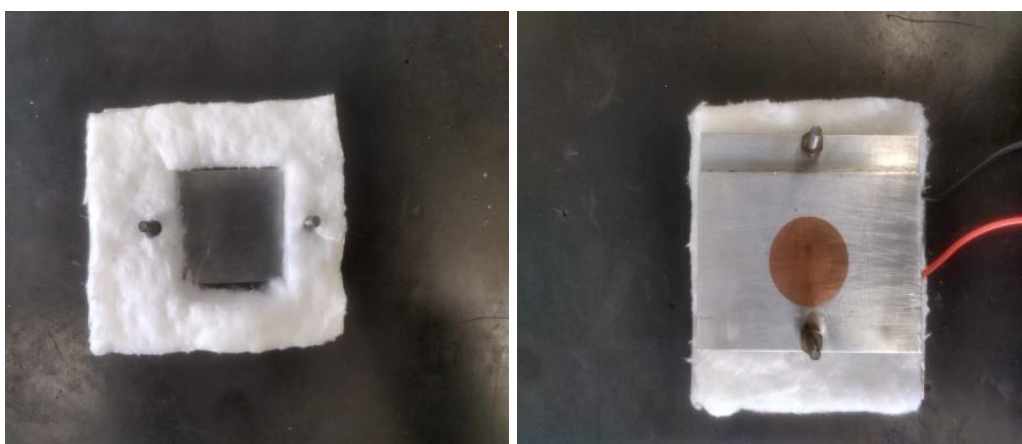


FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

A base consiste em dois perfis estruturais de alumínio, um deles 80 mm x 80 mm x 10mm e o outro com dimensão de 50mm x 60mm x 5mm. Foi necessário realizar um isolamento térmico no entorno do local onde está o módulo termoeétrico, de forma a se estabelecer um fluxo de calor unidimensional somente através do TEG. Para isso, foi colocada ao redor do módulo TEG uma manta cerâmica com condutividade térmica de 0,08 W/mK que suporta temperaturas até 1000°C. O módulo termoeétrico (TEG), foi colocado entre os dois perfis, parafusado e isolado ao seu entorno pela manta de cerâmica, desta forma o arranjo final do dispositivo está representado na Figura 39.

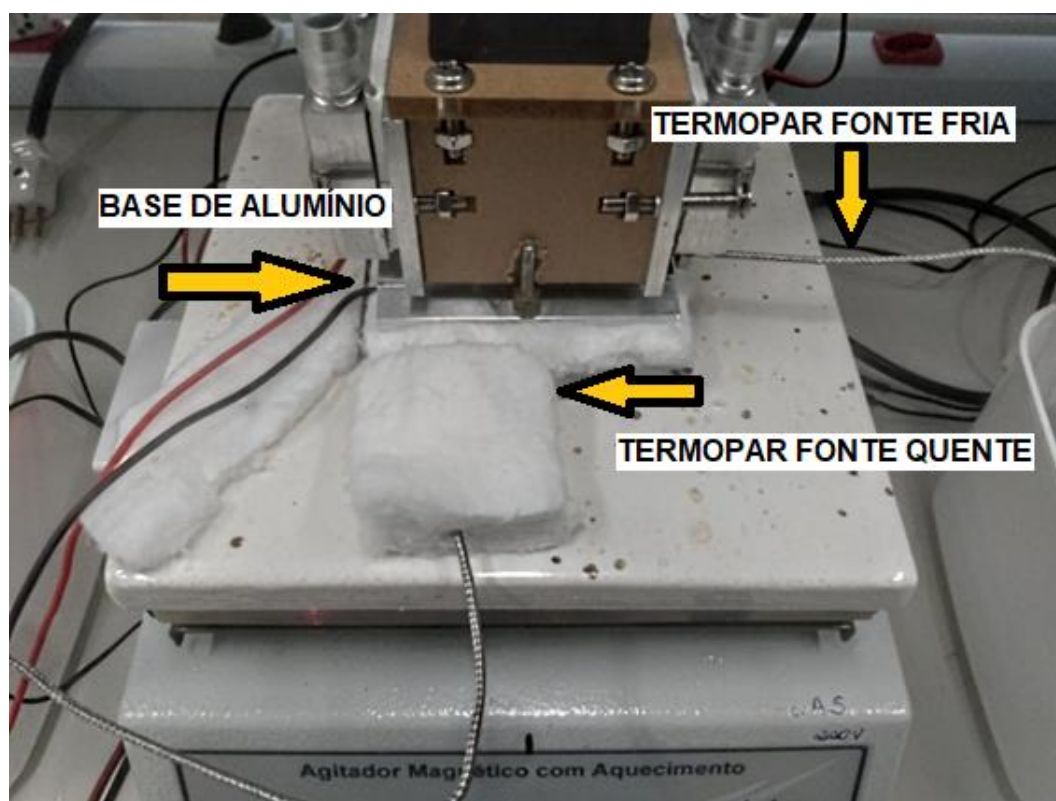
Após o isolamento e a montagem do sistema, foram inseridos dois termopares tipo K no sistema. O primeiro termopar foi colocado na face superior do módulo termoeétrico foi responsável por aferir a temperatura fria. O segundo termopar está localizado na face inferior, para que possa ser medida a temperatura quente. A disposição do suporte para o módulo termoeétrico na bancada experimental, bem como a localização dos termopares é mostrado na Figura 40.

Figura 39 - Instalação do módulo termoeétrico entre as placas de alumínio



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Figura 40 - Detalhe da localização do TEG na bancada experimental



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

3.4.8 Procedimento experimental

Os testes experimentais foram executados no laboratório do Grupo de Automação e Sistemas Integrados (GASI) da UNESP, campus Sorocaba. Para a execução dos testes experimentais, a temperatura ambiente foi mantida por um sistema de ar-condicionado $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e a temperatura do banho de água também foi mantida em $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Primeiramente, acionou-se o sistema de aquisição de dados. Em seguida foi ligada a fonte de bancada que fornece energia ao refrigerador termoelétrico. O sistema de refrigeração a água composto por duas bombas também foi acionado, aguardou-se a temperatura fria se estabilizar em um valor fixo de 4°C . Uma vez realizado esse procedimento, o aparato experimental estava pronto para ser inicializado para a realização do experimento.

Optou-se por iniciar o procedimento experimental realizando-se uma rampa de aquecimento até atingir a temperatura máxima de operação do módulo termoelétrico de 250°C . Após o acionamento das fontes de temperatura quente e fria, seus valores foram registrados a cada 10 segundos utilizando-se os dois termopares do tipo K. Após a aplicação da variação de temperatura o efeito Seebeck começa a se manifestar no módulo termoelétrico. Neste momento uma potência elétrica passa a ser induzida no sistema, e com o auxílio do sistema de aquisição de dados os valores de tensão de circuito aberto (V_{oc}) e corrente de curto-circuito (I_{sc}) foram coletados e armazenados.

O segundo teste foi realizado com o estabelecimento de variações de temperaturas fixas e em regime estacionário, o que implica dizer que o sistema foi condicionado a estabelecer sobre o módulo TEG variações de temperatura de 50°C , 100°C , 150°C , 200°C . Para a obtenção de informações referentes ao gerador termoelétrico, foi utilizado o sistema de aquisição de dados baseado em Arduino. Tal sistema permite comutar cargas resistivas e obter valores de tensão e corrente, e consequentemente, a potência produzida pelo gerador termoelétrico. Para a obtenção dos dados, diferentes resistores de potência foram utilizados de forma a se realizar diferentes associações com o circuito elétrico do sistema de aquisição, e obter assim, as variações de corrente e tensão produzidos pelo gerador submetidos a estas condições.

3.4.9 Protótipo do fogão termoeletrico

Esta seção irá tratar do detalhamento da construção do protótipo de aplicação proposto neste trabalho.

Um fogão a lenha portátil conectado a um pequeno gerador termoeletrico foi construído no intuito de se criar uma aplicação prática para esta tecnologia baseada na termoeletricidade. Sua constituição básica é formada pela câmara de combustão e pelo gerador de energia termoeletrico, ambos os componentes serão explicados em detalhes no decorrer desta seção

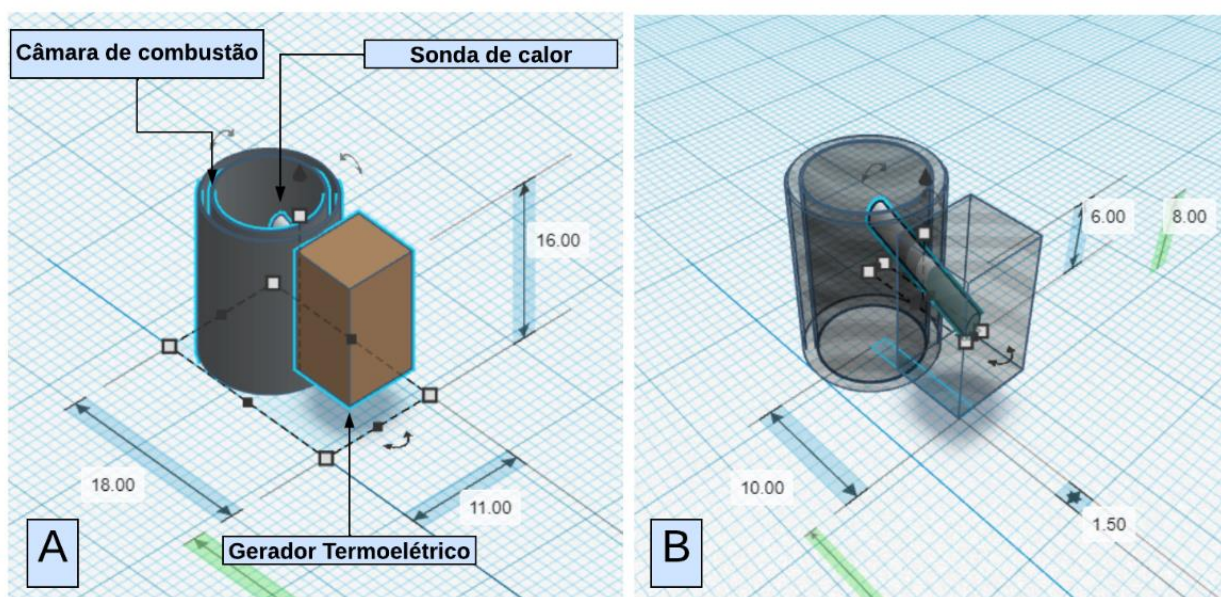
O fogão termoeletrico é constituído, portanto, de uma câmara de combustão conectada através de uma sonda de calor ao gerador TEG, a tecnologia dos geradores termoeletricos, conforme apresentado neste trabalho, irá coletar então o calor residual convertendo-o em potência elétrica.

Essa energia foi distribuída para uma saída USB de 5V e para o carregamento de bateria de Lítio de 3200 mA com o auxílio de um módulo UPS carregador 1S Step UP para bateria 18650. A Figura 12 representa um diagrama esquemático simplificado sobre seu princípio de funcionamento.

A câmara de combustão do fogão a lenha não permite apenas que se queime a biomassa com segurança, mas propicia também uma combustão com maior eficiência através da entrada de ar em seu interior, com o auxílio de um cooler radial. Além disso, a conversão de calor em eletricidade a partir da tecnologia dos materiais termoeletricos, disponibiliza potência elétrica útil aos usuários deste equipamento.

Uma representação do projeto em 3D foi elaborada na plataforma online e gratuita chamada de ThinkerCad, é representada pela Figura 41. A figura A destaca os principais aspectos do designer do projeto, enquanto a figura B demonstra o projeto em transparência para destacar a sonda de calor conectando a câmara de combustão ao gerador termoeletrico.

Figura 41 - Representação em 3D do fogão termoeletrico, medidas em centímetros (cm)



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

A câmara de combustão foi projetada para permitir a passagem de ar entre dois cilindros concêntricos que a compõe, distantes entre si radialmente em 1 cm. O fluxo de ar irá se estabelecer nesta lacuna através da injeção de ar fornecida pelo cooler radial na lateral da câmara de combustão, e irá adentrar a câmara de combustão através das perfurações que foram realizadas no cilindro interno. Uma entrada de ar será confeccionada e alinhada com a saída de ar do cooler. A Figura 42 ilustram respectivamente a câmara de combustão e a entrada de ar.

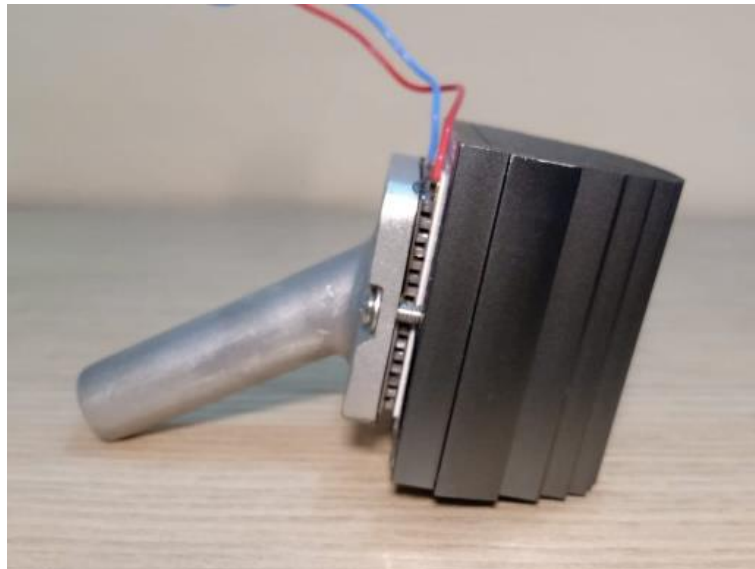
Figura 42 - Design e funcionalidades da câmara de combustão



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Adaptado na lateral ao forno está a sonda de calor, responsável pela condução de calor até o módulo TEG, sendo constituída de alumínio devido a seu alto coeficiente de condução de calor (204 W/mK). Um dissipador de calor também de alumínio foi utilizado para manter a temperatura da fonte fria o mais baixa possível, garantindo assim o estabelecimento de um maior diferencial de temperatura no sistema. A Figura 43 ilustra o arranjo descrito.

Figura 43 – Módulo TEG instalado entre a sonda e o dissipador de calor



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

O módulo TEG estará inserido entre a sonda e o dissipador de calor. Suas especificações sobre desempenho foram extraídas do datasheet do fabricante estão descritas na Figura 44. Os gráficos de desempenho do módulo termoeletrico TG-12 8 se encontram no Anexo B.

Figura 44 – Parâmetro de desempenho do módulo termoeletrico TG-12 8

Hot Side Temperature (°C)	230	170	110
Cold Side Temperature (°C)	50	50	50
Optimum Efficiency, η (%)	4.97	4.08	2.39
Optimum Power (W)	7.95	4.17	1.19
Optimum Voltage (V)	5.25	3.65	1.86
Load Resistance for Opt η (Ω)	3.46	3.20	2.90
Open Circuit Voltage, VOC (V)	9.43	6.48	3.27
Closed Circuit Current (A)	3.38	2.60	1.48
Thermal Resistance (°C/W)	1.13	1.17	1.20

FONTE: Datasheet do fabricante, 2022

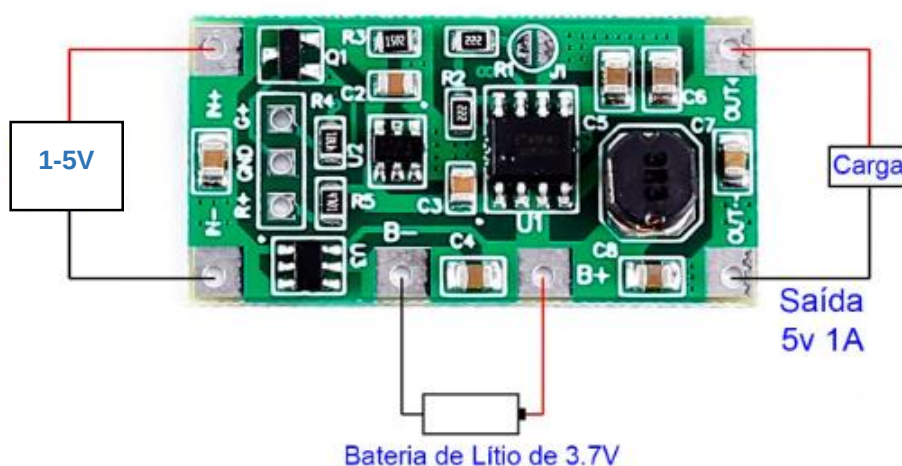
A potência prevista a ser produzida pelo módulo TEG utilizada neste protótipo será de 3W, o necessário para se carregar um celular ou uma lanterna por exemplo.

O arranjo para conduzir a energia elétrica produzida pelo TEG até seus terminais será realizado com a utilização Módulo UPS Carregador 1s Step up.

O módulo UPS é indicado para projetos que possuem a necessidade de se manter o sistema em funcionamento mesmo que haja uma queda de energia, no caso deste trabalho, isto ocorrerá quando não houver combustão, porém mesmo em tal situação, através deste sistema a energia ainda estará disponível na bateria. Para isso deve ser conectado no gerador TEG (TG12-8) o módulo UPS, que terá a função de carregamento da bateria, quando houver uma queda no fornecimento de energia será a bateria que assumirá a alimentação do sistema.

Com este módulo é possível conectar uma bateria de lítio 18650 que possui em média uma tensão que varia entre 3,7V e 4,2V e o módulo se encarrega de elevar essa tensão mantendo uma saída constante de 5V com corrente máxima de 1A. Um botão de liga e desliga será conectado a bateria para o fornecimento e interrupção de energia ao cooler radial. A Figura 45, ilustra o módulo UPS e as suas principais conexões.

Figura 45 – Módulo UPS carregador 1s step up



FONTE: Datasheet do fabricante

As especificações técnicas do módulo representado pela Figura 45 são:

- Entrada: 1 até 5V
- Saída: 5V 1A (máx.);
- Baterias que podem ser carregadas: bateria de polímero de lítio, 18650
- Dimensões aproximadas: 73mm x 15mm x 45mm;

Todo aparato eletrônico e mecânico já mencionado detalhadamente, constituído pelo módulo carregador, bateria, sonda e dissipador de calor serão acondicionados em uma caixa de madeira (MDF) projetada sob medida para esta finalidade, todas as peças utilizadas na construção do fogão termoeletrico são mostradas conforme a Figura 46. Seu custo total está descrito no Anexo C.

Figura 46 - Materiais utilizados para construção do fogão termoeletrico



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Após a montagem de todas as peças apresentadas na Figura 46, obteve-se o gerador de energia termoelétrico. A Figura 47 mostra do protótipo de fogão termoelétrico concluído.

Figura 47 – Protótipo do fogão termoelétrico



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

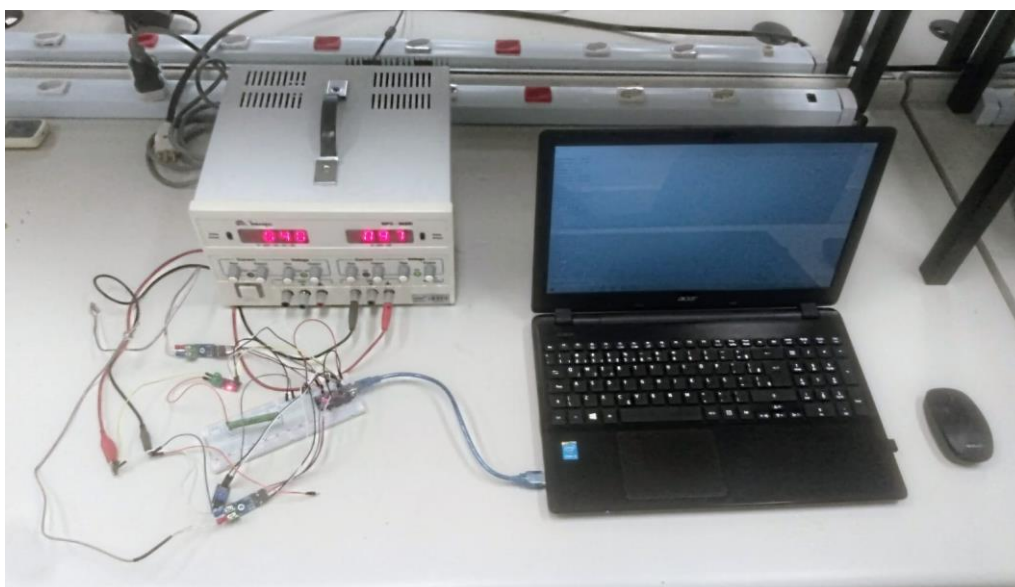
4. Resultados e discussões

Neste capítulo será realizada uma apresentação seguida dos comentários pertinentes referente aos principais resultados obtidos durante a realização deste ensaio laboratorial. Também será discutido o desempenho do protótipo a partir dos testes realizados em condições reais de aplicação.

4.1 Validação do sistema de aquisição de dados

Foi montado um ensaio experimental para realizar a validação do sistema de aquisição de dados conforme demonstrado na Figura 48.

Figura 48 - Aparato experimental para realizar a validação dos sensores de corrente e tensão



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Os valores de corrente e tensão fornecidos pela fonte Minipa foi adotada como referência de valores reais, em seguida tais valores foram comparados com os valores obtidos do sistema de aquisição de dados, e com um multímetro digital da marca Fluke, as aferições foram realizadas em duplicatas e posteriormente seus referentes gráficos foram plotados para melhor visualização dos resultados obtidos, e estão representados pelas Figuras 49 e 50. As Tabelas 1 e 2 expressam os resultados obtidos na validação para a corrente e tensão, incluindo o erro associado para cada instrumento.

Tabela 1 – Resultados da validação para o sensor de corrente

Medida	REFERÊNCIA	MEDIDA 1		MEDIDA 2		Multímetro	Arduíno
Instrumento	Fonte	Multímetro	Arduíno	Arduíno	Multímetro	Erro (%)	Erro (%)
Corrente	0,20	0,19	0,18	0,18	0,18	5,00	-10,00
Corrente	0,40	0,40	0,37	0,37	0,37	0,00	-7,50
Corrente	0,60	0,59	0,57	0,57	0,58	1,67	-3,33
Corrente	0,80	0,79	0,78	0,78	0,79	1,25	-1,25
Corrente	1,00	1,00	0,98	0,98	0,99	0,00	-1,00
Corrente	2,00	1,99	1,99	1,97	1,98	0,50	-1,00

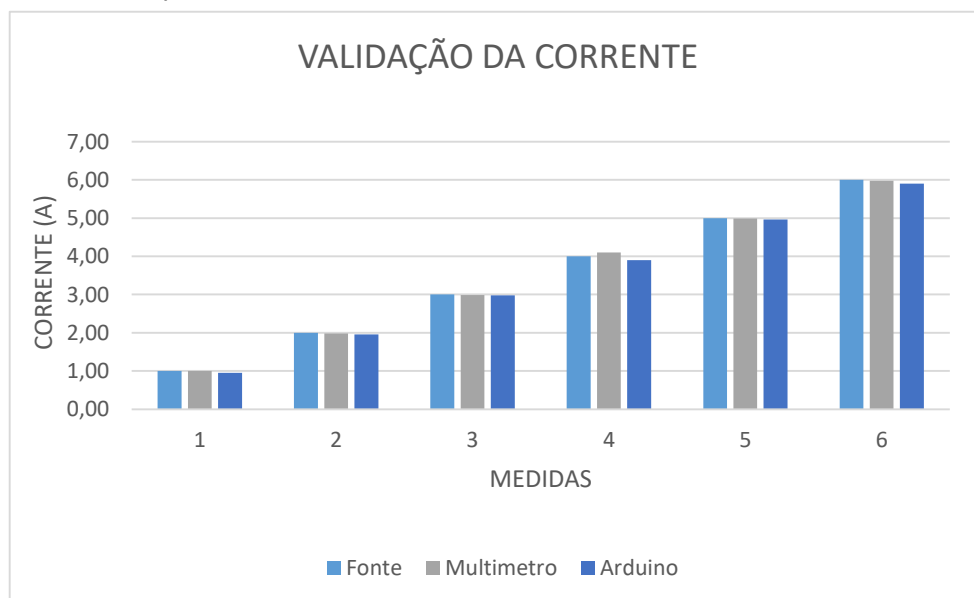
FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Tabela 2 - Resultados da validação para o sensor de tensão

Medida	REFERÊNCIA	MEDIDA 1		MEDIDA 2		Multímetro	Arduíno
Instrumento	Fonte	Multímetro	Multímetro	Arduíno	Arduíno	Erro (%)	Erro (%)
Tensão	1,00	0,99	1,00	0,95	0,96	-1,00	-5,00
Tensão	2,00	1,98	1,99	1,96	1,97	-1,00	-2,00
Tensão	3,00	2,98	2,99	2,98	2,97	-0,67	-0,67
Tensão	4,00	4,00	4,10	3,90	4,14	0,00	-2,50
Tensão	5,00	4,98	4,99	4,96	4,98	-0,40	-0,80
Tensão	6,00	5,98	5,97	5,90	6,00	-0,33	-1,67

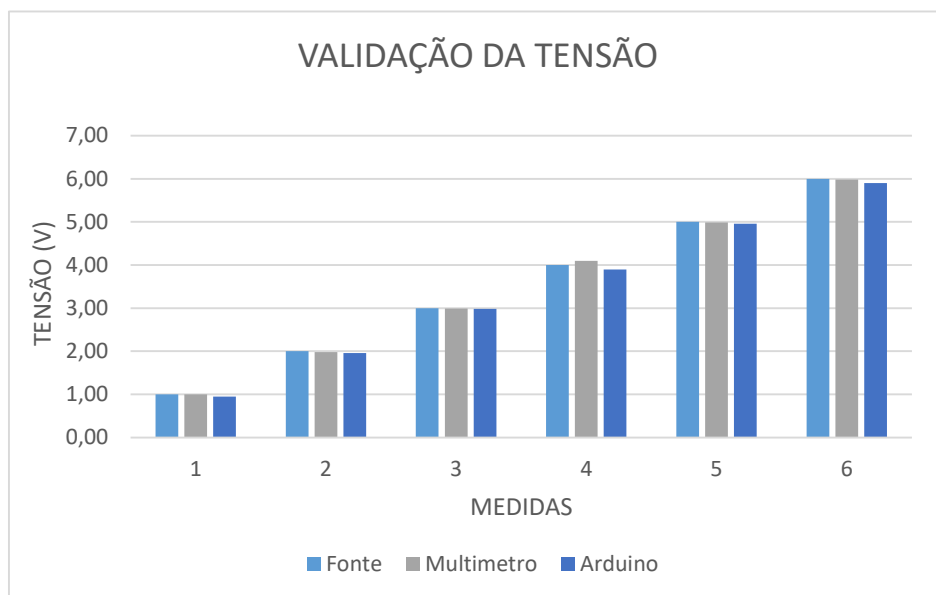
FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Figura 49 - Gráfico comparativo de medidas de corrente entre o multímetro e o sensor de corrente



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

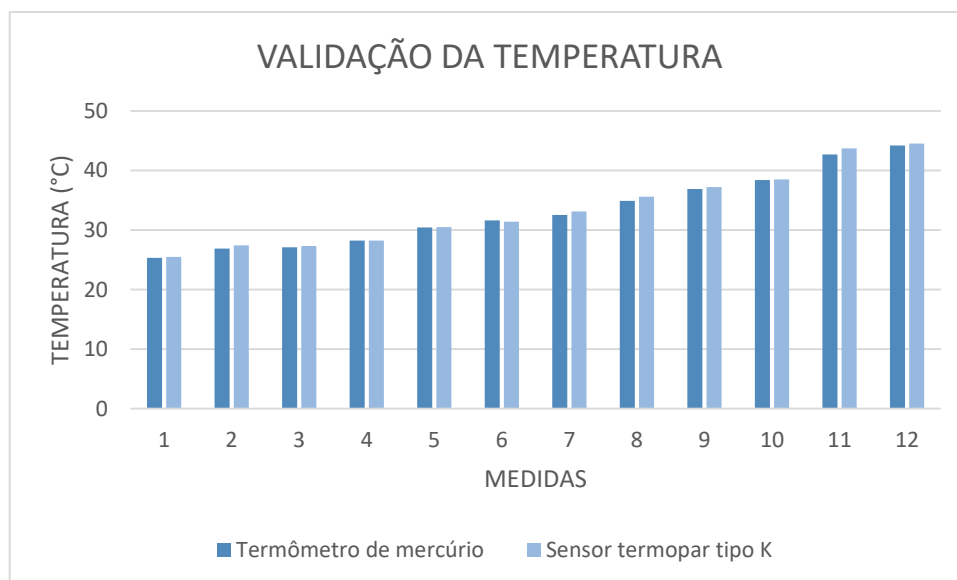
Figura 50 - Gráfico comparativo de medidas de corrente entre o multímetro e o sensor de tensão



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Os valores de temperatura obtidos pelo sensor termopar do tipo K foram comparados com um termômetro de bulbo de mercúrio da marca Incoterm-MyLabor. Os resultados de todas essas medidas estão expressos na Figura 51.

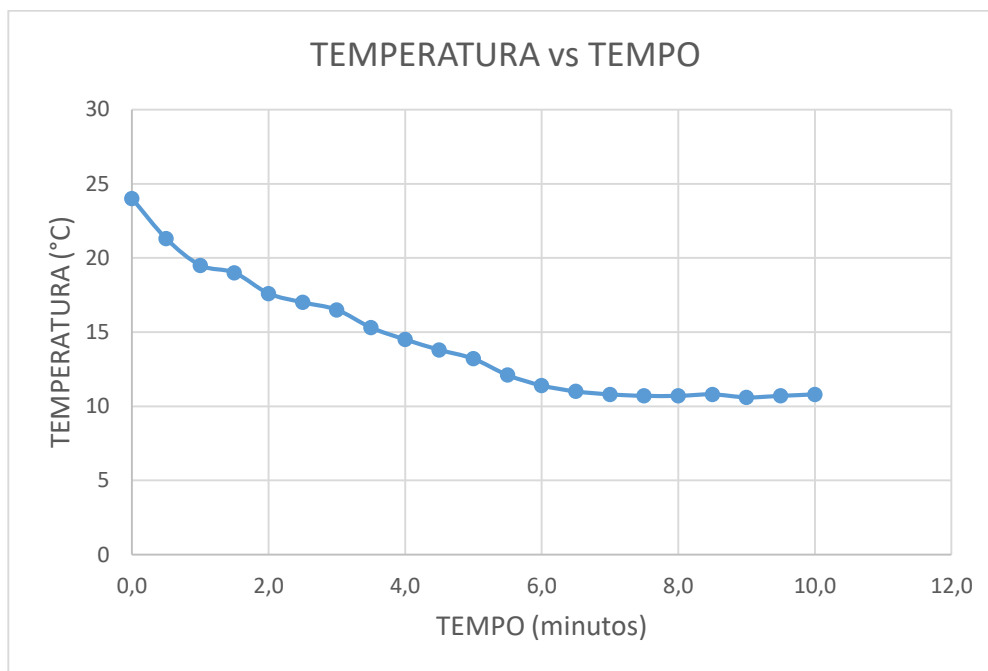
Figura 51 – Validação do sensor de temperatura



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Ao finalizar a montagem da fonte fria efetuou-se uma avaliação de seu funcionamento no intuito de validar sua operação. A Figura 52 demonstra que em um intervalo de 6 minutos o refrigerador consegue atingir um regime permanente de operação, momento em que as temperaturas do ar refrigerado atingiram valores em torno de 10,8 °C.

Figura 52 - Desempenho da fonte fria



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

4.2 Caracterização do módulo termoeletrico

Para se realizar a caracterização do dispositivo termoeletrico, e no intuito de melhorar a compreensão sobre seus princípios e funcionamento, dois ensaios foram realizados para se caracterizar o módulo termoeletrico, ambos estão descritos no decorrer deste capítulo.

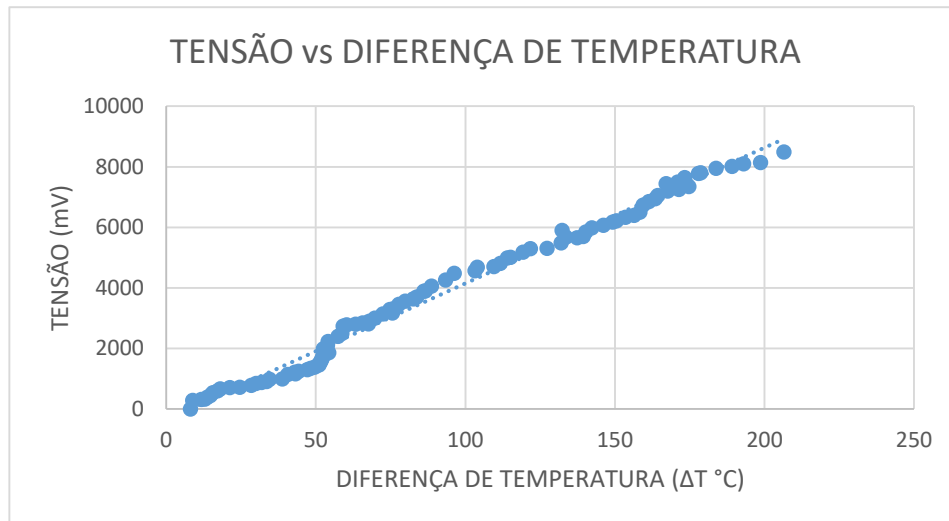
4.2.1 Ensaio de circuito aberto

O ensaio de circuito aberto consiste em aplicar um determinado gradiente de temperatura e medir as grandezas térmicas (temperatura, fonte quente e fria) e a tensão elétrica gerada nos terminais de saída (V_{out}). A coleta de dados deste

procedimento foi realizada com o auxílio de dois multímetros para a coleta da tensão, e com o sistema de aquisição para a coleta dos valores de temperaturas.

Apresenta-se na Figura 53, o gráfico obtido a partir dos resultados do ensaio em circuito aberto que demonstra a tensão de saída (V_{out}) para diferentes gradientes de temperatura (ΔT).

Figura 53 – Gráfico da tensão em função da diferença de temperatura para o ensaio de circuito aberto



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Com base nos dados contidos na Figura 53, que representa o gráfico de tensão vs diferença de temperatura, percebe-se que a tensão gerada apresenta a tendência de um comportamento linear em função da variação da temperatura.

A equação 9 apresenta o resultado do ajuste obtido com a linha de tendência com os dados coletados, o seu coeficiente angular representa o coeficiente de Seebeck do material, e possui o valor de 44,78 mV/°C, este valor significa que para o incremento de 1°C de variação de temperatura, a tensão de 44,78mV é induzida pelo efeito Seebeck

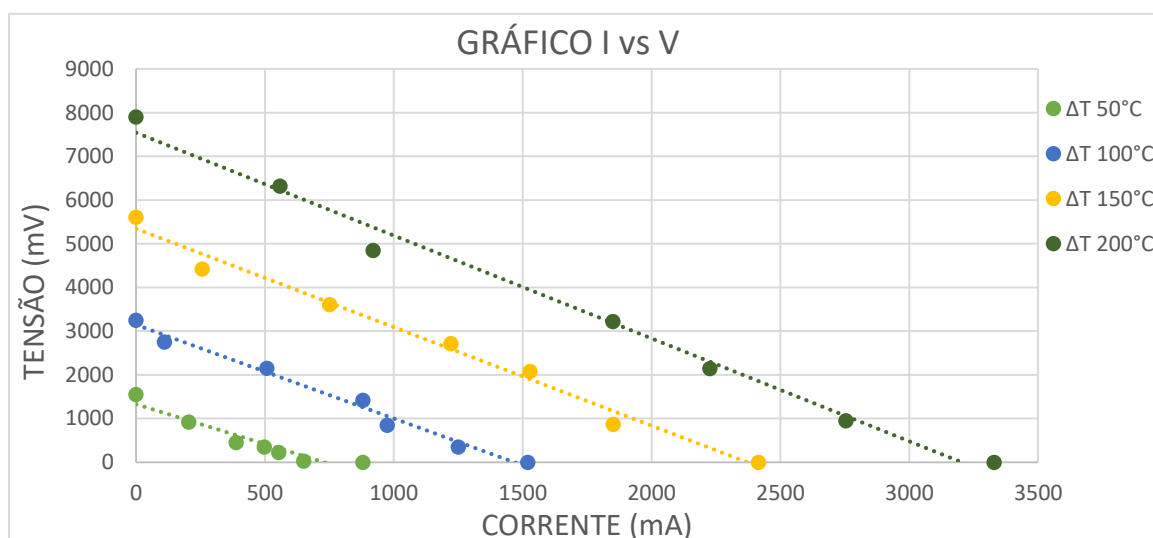
$$V = 44,781\Delta T - 329,57 \quad (9)$$

Nota-se que existe um valor negativo de offset (-329,57), na equação de tensão em função da temperatura, isto ocorreu pois as coletas dos dados não iniciaram com uma variação de temperatura igual a zero, mas sim pela diferença de temperatura da fonte quente ($T_{ambiente} = 23,6^{\circ}\text{C}$) e pela temperatura da fonte fria ($T_{fria} = 10,8^{\circ}\text{C}$).

4.2.3 Ensaio de circuito fechado

Durante o ensaio laboratorial de aplicação de carga resistivas no gerador, torna-se possível a obtenção através sistema de aquisição de dados aferir-se valores de corrente, tensão e temperatura, estes são os principais parâmetros a serem mensurados durante a execução dos testes, uma vez que permitem através da teoria geral dos geradores elétricos determinar o comportamento da potência do gerador quando submetido a diferentes valores de temperatura. A Figura 54 apresenta uma correlação entre os dados de Corrente (mA) e tensão (mV) obtidos em bancada experimental em função de diferentes valores de gradientes de temperaturas.

Figura 54 - Curva característica (I vs V) do módulo termoeletrico



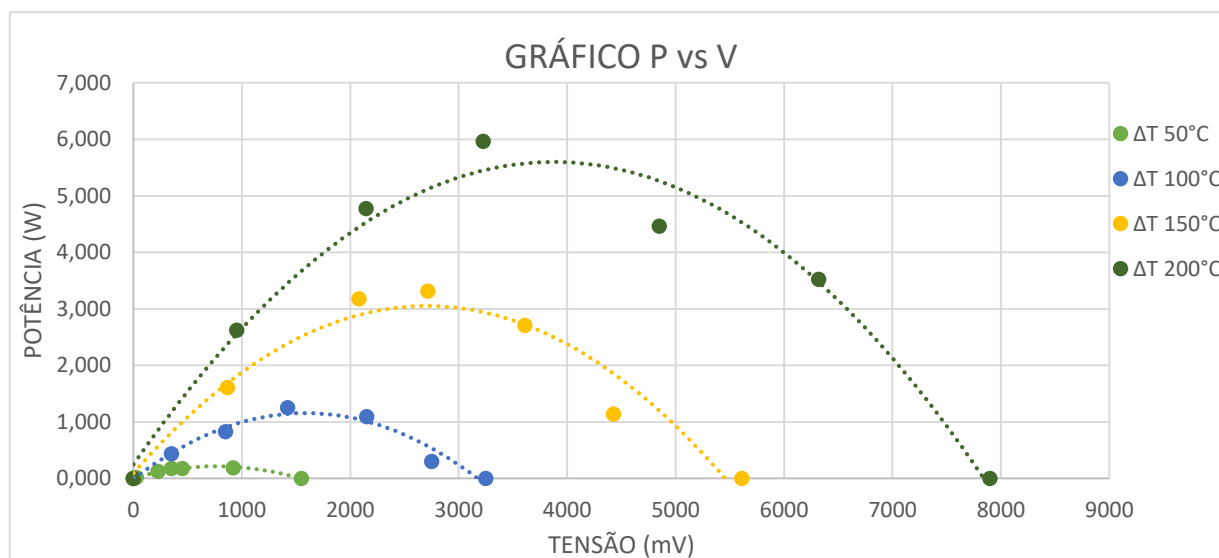
FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

A partir da análise da Figura 54, percebe-se uma tendência linear entre os valores de corrente e tensão obtidos para a elaboração da curva característica de um gerador elétrico, tal comportamento é explicado pela teoria geral dos geradores elétricos que prevê tal proporcionalidade. Nota-se também que tensão de circuito aberto (V_{oc}) bem como, a corrente de curto-circuito (I_{cc}) aumenta de maneira diretamente proporcional ao incremento do gradiente de temperatura (ΔT). A equação que descreve a curva de um gerador termoeletrico é dada pela equação 5 descrita no capítulo 2.

Analisando a curva da Figura 54, pode ser observado que o ponto da curva que toca o eixo da corrente foi a corrente de curto-circuito, ao passo que o ponto que toca o eixo tensão corresponde à força eletromotriz, ou então, tensão de circuito aberto.

Tratando-se agora da potência gerada pelo TEG, a Figura 55 apresenta os valores de potência gerados em função da tensão de saída do gerador e os gradientes de temperatura.

Figura 55 - Curva característica (P vs V) do módulo termoeletrico



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Como esperado, as curvas características de potência do gerador elétrico obtidas possuem um comportamento quadrático. Além disso, pode ser notado que quanto maior o gradiente de temperaturas, maiores os valores de potência.

Finalmente, para a obtenção da curva característica do gerador termoeletrico, que relaciona a potência útil com o gradiente de temperaturas, foi realizado um ajuste de curvas com os valores obtidos experimentalmente.

Sabe-se que uma função quadrática possui a fórmula geral $f(x) = ax^2 + bx + c$, é possível a partir dos coeficientes a , b e c para encontrar as coordenadas do vértice de uma função. Tais coordenadas do vértice serão exatamente as coordenadas dos pontos de máximo ou de mínimo das curvas.

A coordenada x do vértice de uma função é representada por X_v , tem-se a equação:

$$X_V = -\frac{b}{2a} \quad (10)$$

Já a coordenada y vértice é chamada de Y_V é dada pela equação:

$$Y_V = -\frac{b^2 - 4ac}{4a} \quad (11)$$

A partir destas equações é possível obter os valores de potência máxima e seus respectivos valores de corrente e tensão. Apresentado na Tabela 3, é possível obter os valores de corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto.

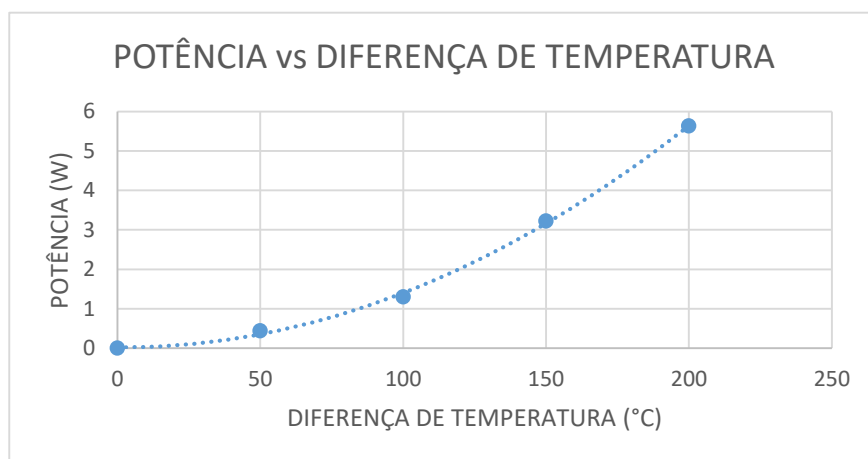
Tabela 3 - Resumo dos principais resultados obtidos na caracterização do módulo termoeletrico

	$\Delta T \text{ } 50^{\circ}\text{C}$	$\Delta T \text{ } 100^{\circ}\text{C}$	$\Delta T \text{ } 150^{\circ}\text{C}$	$\Delta T \text{ } 200^{\circ}\text{C}$
Corrente Máxima (A)	0,51	0,81	1,15	1,44
Tensão Máxima (V)	0,82	1,60	2,83	3,91
Potência Máxima (W)	0,44	1,30	3,09	5,63
Tensão de Circuito Aberto (V)	0,66	3,21	6,83	7,84
Corrente de Curto-Circuito (A)	0,62	1,53	2,41	3,21

FONTE: Elaborada pelo autor

A curva de potência máxima do gerador para as diferentes variações de temperatura é apresentada pela Figura 56. Pode ser observado que com o aumento da diferença de temperatura a potência de saída cresce de forma quadrática, sendo limitada somente pela temperatura de operação do gerador termoeletrico, que é de 250°C .

Figura 56 - Curva de potência útil do módulo termoeletrico



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Além disso, o ajuste da curva da Figura 56 apresenta elevado coeficiente de determinação, $R^2 = 0,999$, indicando que os dados obtidos mantiveram um bom padrão de comportamento em relação à temperatura. Também pode ser observado pela Figura 21 que todas as temperaturas às quais o gerador foi exposto encontram-se dentro da faixa apresentada de Figura de Mérito para o telureto de bismuto.

4.3 Análise do desempenho do fogão termoeletrico

O ensaio de validação do protótipo do fogão termoeletrico consiste em mensurar as grandezas térmicas (ΔT), que posteriormente serão comparados com a Figura 56 obtida no ensaio de caracterização. Este teste foi realizado através de uma rampa de aquecimento gerada por um teste experimental em condições reais de aplicação do protótipo, permitindo obter-se a potência do fogão termoeletrico em condições reais de aplicação. O aparato experimental para este teste está apresentado na figura 57, e os resultados das medidas na Figura 58

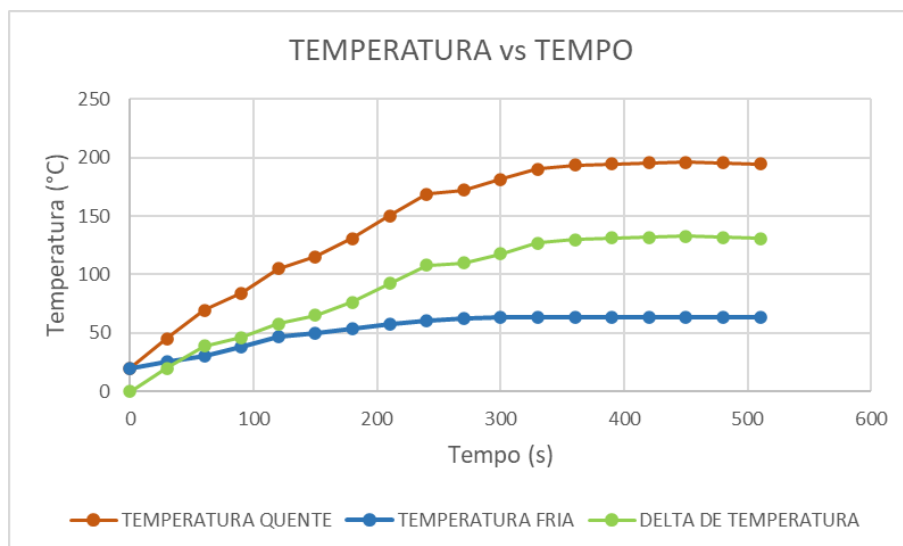
Figura 57 - Experimento para se determinar a variação de temperatura no fogão termoeletrico em condições reais de aplicação



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Observa-se a partir da análise da Figura 58 que o sistema atinge um regime estacionário em relação as variações de temperaturas em aproximadamente 400 segundos, ou 6,6 minutos, com um valor de 140,1 °C de diferença de temperatura.

Figura 58 – Rampa de aquecimento aplicada no fogão termoelétrico



FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Em posse da variação de temperatura de 140,1°C obtida neste experimento, é possível a partir do gráfico da curva de potência do módulo termoelétrico (Figura 56), obter a potência do fogão termoelétrico. Desta forma constatou-se que o fogão termoelétrico apresenta uma potência próxima de 3,09 W, tensão de 2,83 V e corrente de 1,15 A, valores suficiente para se carregar um celular.

A Tabela 4 exibe as principais especificações técnicas do fogão termoelétrico.

Tabela 4 - Resultados obtidos para o fogão termoelétrico

PARÂMETROS AVALIADOS	RESULTADOS
POTÊNCIA (W)	3,09
TENSÃO (V)	2,83
CORRENTE (A)	1,15
TEMPO DE CARREGAMENTO DE UM CELULAR (h)	6,2

FONTE: Elaborada pelo autor, 2022

Foi testado o tempo de carregamento do celular conectado ao fogão termoelétrico, foi constatado que o tempo para carga completa é de 6,2 horas. O perfil de carregamento lento se dá pelo ganho de tensão que o módulo conversor boost (step up) proporciona, enquanto diminui a corrente.

5. Conclusões

Neste trabalho foi realizada um estudo experimental acerca da utilização de geradores termoelétricos para conversão de energia térmica em energia elétrica através do efeito Seebeck. Para tal, foi desenvolvido um aparato experimental e um sistema de aquisição de dados pela plataforma Arduino, que permitiu realizar a caracterização de um gerador termoelétrico através da obtenção de suas curvas características, verificando seu desempenho em diferentes faixas de temperaturas.

Desta forma, foram realizados testes experimentais em circuito aberto em que o dispositivo foi capaz de gerar 8,5V. Nos ensaios em circuitos fechado notou-se que a medida em que a diferença de temperatura estabelecida no TEG aumenta sua potência também aumenta. Seu desempenho neste ensaio mostrou-se satisfatório, o dispositivo conseguiu gerar 5,63W de potência com uma diferença de temperatura de 200°C.

Esta pesquisa mostrou que apesar de gerar uma pequena quantidade de potência elétrica, o gerador termoelétrico analisado, se apresenta como uma alternativa viável para aumentar a eficiência de processos em que tem-se calor dissipado para o ambiente, além de trazer contribuições para o entendimento de que a área de reaproveitamento de energia térmica é muito promissora, já que a dissipação desta energia torna-se um fator praticamente inevitável em qualquer processo, apresentando a tendência então de acarretar em ganhos energéticos nos locais em que se aplica tal tecnologia, sem realizar a degradação do meio ambiente.

A construção do protótipo de um fogão termoelétrico foi viabilizada a partir da análise da caracterização do módulo termoelétrico, que se mostrou suficiente para atender a demanda energética da aplicação proposta. O objetivo de se disponibilizar uma tensão de saída de 5V, o suficiente para se carregar pequenos dispositivos eletrônicos foi atendida.

O fogão termoelétrico foi capaz de produzir uma potência máxima nas condições reais de aplicação de 3W, com uma tensão de 2,83V e corrente de 1,15A. Este resultado é bastante atrativo, pois demonstra a viabilidade técnica de aplicação de módulos termoelétricos em processos de captação de energia térmica residual para a conversão em potência elétrica útil.

Conforme relatado no capítulo 2 deste trabalho, o acesso à eletricidade é limitada para mais de 1,2 bilhão de pessoas, logo carregar um celular apesar de ser algo corriqueiro a maioria das pessoas, não é uma realidade para as bilhões que vivem em situação de exclusão energética, e entende-se o celular como uma ferramenta transformadora para o desenvolvimento econômico e para comunicação, portanto o carregamento de um celular utilizando uma fonte limpa de energia foi a maior conquista desta pesquisa.

Referências bibliográficas

ALMEIDA, C.H.A. **Caracterização de célula termoelétrica para geração de energia elétrica.** 2015. 67 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal da Paraíba – UFPB. 2015.

AHMED, T. **The Effect of Manufacturing Methods and Different Shapes on the Release Pattern of Diclofenac Sodium Matrix Tablet.** 2009. 80 f. S. J. Pharm. Sci, 2009.

BORBA, A. C. DE et al. **Análise experimental e analítica de geradores termoelétricos aplicados em nanossatélites.** 2019. 105 f. Dissertação de mestrado – Universidade federal de Santa Catarina, campus Joinville, SC. 2019.

BRUCE N. **Poluição do ar interno em países em desenvolvimento: um grande desafio ambiental e de saúde pública.** Organização Mundial da Saúde, pp. 1080 – 1092. 2019.

CALLEN, H. **Thermodynamics and introduction to thermostatics.** New York: John Wiley Sons, 1985.

DIMITRIEV, A.; ZVYAGIN, I. **Current trends in the physics of thermoelectric materials.** Physics-Uspekhi, v. 53, p. 789–803, 2010.

D. Champier, C. Favarel, J.P. Bedecarrats, T. Kousksou, J.F. Rozis **Prototype combined heater/thermoelectric power generator for remote applications J. Electron. Mater.** 2013.

FERNANDES, A. E. S. dos S. **Conversão de Energia com Células de Peltier.** 2012. 97 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

Forman, Clemens & Muritala, Ibrahim & Pardemann, Robert & Meyer, Bernd. **Estimating the global waste heat potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews.** . Applied Energy, v. 87, n. 10, p. 3131-3136, 2016.

HILLHOUSE, H.; TUOMINEN, M. **Modeling the thermoelectric transport properties of nanowires embedded in oriented microporous and mesoporous films.** Microporous and Mesoporous Materials, v. 47, p. 39–45, 2001.

INCROPERA, F.P., BERGMAN, T.L., DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**, 6ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro-RJ, 111-114p. 2008.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Pesquisa de Orçamentos Familiares 2019 (POF)**. Rio de Janeiro: IBGE; 2019.

B.I. Ismail, W.H. Ahmed. **Thermoelectric power generation using waste-heat energy as an alternative green technology** Recent Patents on Electrical Engineering, pp. 27-39. 2009.

K. Qiu, A.C.S. Hayden. **Integrated thermoelectric generator and application to self-powered heating systems** In: Proceedings of 25th International Conference on Thermoelectrics, Vienna, Austria, August (2006)

KUBOV K.I.; DYMYTROV Y.Y. **LTspice-model of thermoelectric Peltier-Seebeck element**, IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Ukraine, 2016.

MARTINS, A. B. G. **Maximização do desempenho de módulos de refrigeração termoelétrica mediante algoritmos genéticos**. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, 2007.

D. Mastbergen, B. Willson **Generating light from stoves using a thermoelectric generator** In: the ETHOS international stove research conference, Seattle, Washington (2005)

C. Lertsatitthanakorn **Electrical performance analysis and economic evaluation of combined biomass cook stove thermoelectric (BITE) generator** *Bioresour. Technol*, 98 pp. 1670-1674. 2007.

Makena, Harish & Reddy, D. & Reddy, A.N.R. **Thermoelectric Power Generation from Biomass Cook Stove: A Waste Heat to Energy Conversion**. 2014.

MINNICH, A.; DRESSELHAUS, M.; REN, Z.; CHEN, G. **Bulk nanostructure thermoelectric materials: Current research and future prospects**. *Energy Environmental Science*, v. 2, 2009.

ONU – Estratégia dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em:<<http://www.estrategiaods.org.br/artigos/acesso-a-energia-desafios-para-erradicar-a-exclusao-eletrica/>>. Acessado em 22 de maio de 2020.

GALDINO, I.R. **Um Estudo do Experimento de Faraday em Três Livros Didáticos de Física do Ensino Médio**. 2015. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Licenciatura em Física) – Curso de Licenciatura Plena em Física, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2015.

GARZON, M. **Development and Analysis of the Thermal Design for the OSIRIS-3U Cubesat**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Aeroespacial, The Pennsylvania State University, University Park, 2012.

G.J. Snyder **Small thermoelectric generators** *Electrochem. Soc. Interface* (pp. 54-56. 2008.

H. O'Hanley **Performance of a stove mounted thermoelectric generator** Written in 2.671 Measurement and Instrumentation, Fall. 2009.

OMS, 2020: **THE GLOBAL HEALTH OBSERVATORY**. Disponível em: https://www.who.int/gho/phe/indoor_air_pollution/burden/en/. Acessado em 22 de maio de 2020.

PICHANUSAKORN, P.; BANDARUP. **Nanostructured thermoelectrics. Materials Science and Engineering R**, v. 67, p. 19–63, 2010.

R.Y. Nuwayhid, F. Moukalled, R. AbuSaid, M. Daaboul **Practical design considerations for a rural stove-top thermoelectric generator** In: Proceedings of 19th International Conference on Thermoelectrics, pp. 490-497. 2000.

ROWE, D. M. **A high performance solar powered thermoelectric generator, Applied Energy**, v. 8, p. 269– 273, 1981.

RUSH, Robert. **Solar flat plate thermoelectric generator research**, Technical Documentary Report for Air Force Aero Propulsion Laboratory, Report number: APL TDR 64–87, Ohio. 1964.

SOARES, Thelma Shirlen et al. **USO DA BIOMASSA FLORESTAL NA GERAÇÃO DE ENERGIA. 2006. 9 p. Artigo (USO DA BIOMASSA FLORESTAL NA GERAÇÃO DE ENERGIA - ENGENHARIA FLORESTAL)-** Universidade Federal de Viçosa, Garça, 2006. Disponível em: . Acesso em: 17 set. 2018.

T.A. SESAN. **What's cooking?** Participatory and market approaches to stove development in Nigeriaand Kenya University of Nottingham, U.K. 2011.

SOARES, Thelma Shirlen et al. **USO DA BIOMASSA FLORESTAL NA GERAÇÃO DE ENERGIA. Artigo (USO DA BIOMASSA FLORESTAL NA GERAÇÃO DE ENERGIA - ENGENHARIA FLORESTAL)-** Universidade Federal de Viçosa, Garça, 2006.

W. Haslinger, G. Friedl, E. Wopienka, B. Musil, M. Wörgetter and R. Padinger,
**“Small-scale Pellet Combustion Technology – State of the Art, recent
Development, Improvements and Challenges for the
future”**, Austrian Bioenergy Centre GmbH (ed.), Wieselburg, Austria, 2005.

Anexo A – Algoritmo utilizado no sistema de aquisição de dados

// CÓDIGO ARDUINO SENSOR DE TENSÃO DC (SENSOR DE TENSÃO DC de 1V / 25 V, SENSOR DE CORRENTE (até 5A DC) E DOIS TERMOPARES

```
#include "max6675.h" //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA
```

```
//sensor 1
```

```
int ktcSO = 8; //PINO DIGITAL (SO)
```

```
int ktcCS = 9; //PINO DIGITAL (CS)
```

```
int ktcCLK = 10; //PINO DIGITAL (CLK / SCK)
```

```
//sensor2
```

```
int ktcSO2 = 4; //PINO DIGITAL (SO)
```

```
int ktcCS2 = 5; //PINO DIGITAL (CS)
```

```
int ktcCLK2 = 6; //PINO DIGITAL (CLK / SCK)
```

```
const int pinoSensor = A2; //PINO ANALÓGICO EM QUE O SENSOR ESTÁ CONECTADO
```

```
float tensaoEntrada = 0.0; //VARIÁVEL PARA ARMAZENAR O VALOR DE TENSÃO DE ENTRADA DO SENSOR
```

```
float tensaoMedida = 0.0; //VARIÁVEL PARA ARMAZENAR O VALOR DA TENSÃO MEDIDA PELO SENSOR
```

```
float valorR1 = 30000.0; //VALOR DO RESISTOR 1 DO DIVISOR DE TENSÃO
```

```
float valorR2 = 7500.0; // VALOR DO RESISTOR 2 DO DIVISOR DE TENSÃO
```

```
int leituraSensor = 0; //VARIÁVEL PARA ARMAZENAR A LEITURA DO PINO ANALÓGICO
```

```
MAX6675 ktc1(ktcCLK, ktcCS, ktcSO); //CRIA UMA INSTÂNCIA UTILIZANDO OS PINOS (CLK, CS, SO)
```

```
MAX6675 ktc2(ktcCLK2, ktcCS2, ktcSO2); //CRIA UMA INSTÂNCIA
UTILIZANDO OS PINOS (CLK, CS, SO)

//PINO DO SENSOR ACS712
int sensorACS712 =A0;

// PINO DO SENSOR DE TENSÃO ANALÓGICA(A2) UTILIZADA PELO
SENSOR DE TENSÃO
int sensorTensaoDC = A1;

// DECLARAÇÃO DE VARIÁVEL QUE RECEBE O VALOR LIDO NA PORTA
ANALÓGICA A1
float valorTensaoDC;

// DECLARAÇÃO DA VARIÁVEL DA MEDIA DE AMOSTRAGEM
int amostragem =1000;

// DECLARAÇÃO DA VARIÁVEL DA SOMA DA MEDIA DE AMOSTRAGEM
float mediaTotalTensaoDC =0;

// DECLARAÇÃO DE VARIÁVEL QUE RECEBE O VALOR FINAL
CONVERTIDO EM VOLTS DC
float valorFinalTensaoDC = 0;

//VARIABLES COM OS VALORES DOS RESISTORES DO SENSOR DE
TENSÃO DC
float R1 = 30000.0;
float R2 = 7500.0;

// DECLARAÇÃO DA VARIÁVEL AUXILIAR
int sensorValue_aux = 0;

// DECLARAÇÃO DA VARIÁVEL QUE FARÁ LEITURA DIRETO NO
SENSOR ACS712
```

```

float valorSensorACS712 = 0;

// DECLARAÇÃO DA VARIÁVEL QUE FARÁ LEIUTURA DE CORRENTE
float valorCorrente = 0;

// DECLARAÇÃO DA VARIÁVEL DA CONSTANTE DO ADC 5/1023
float voltsporUnidade = 0.004887586;// 5%1023

//DECLARAÇÃO DA VARIÁVEL DE SENSIBILIDADE DO ACS712
float sensibilidade = 0.185;

//DECLARAÇÃO DA VARIÁVEL DE DESVIO DO ACS712 (OPCIONAL)
float desvioACS712 = 0.045;

void setup(){
  //VALOR REFERENCIAL
  analogReference(DEFAULT);

  // INICIALIZA A PORTA SERIAL
  Serial.begin(9600);

  // DECLARA QUE A PORTA DO SENSOR DE TENSAO DC
  pinMode(sensorTensaoDC, INPUT);

  //PINO SENSOR DE CORRENTE ACS712
  pinMode(sensorACS712, INPUT);
}

void loop() {

  //TERMOPARES

  Serial.print("Temperatura 1: "); //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR SERIAL

```

```

Serial.print(ktc1.readCelsius()); //IMPRIME NO MONITOR SERIAL A
TEMPERATURA MEDIDA
Serial.println("*C"); //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR SERIAL
delay(1000); //INTERVALO DE 500 MILISSEGUNDOS

Serial.print("Temperatura 2: "); //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR SERIAL
Serial.print(ktc2.readCelsius()); //IMPRIME NO MONITOR SERIAL A
TEMPERATURA MEDIDA
Serial.println("*C"); //IMPRIME O TEXTO NO MONITOR SERIAL
delay(1000); //INTERVALO DE 500 MILISSEGUNDOS

//REINICIA O VALOR ATUAL E ATUALIZA NA PRÓXIMA LEITURA
valorSensorACS712 =0;

//REINICIA O VALOR ATUAL E ATUALIZA NA PRÓXIMA LEITURA
valorFinalTensaoDC = 0;

//REINICIA O VALOR ATUAL E ATUALIZA NA PRÓXIMA LEITURA
mediaTotalTensaoDC = 0;

//INICIA A AQUISIÇÃO DOS VALORES PARA MEDIR A CORRENTE
CONSUMIDA
//INICIA A AQUISIÇÃO DOS VALORES PARA MEDIR A TENSÃO
CONSUMIDA
for(int i=0; i < amostragem ; i++){
    // le o sensor na pino analogico A0 e ajusta o valor lido ja que a saída do
    sensor é
    //(1023)vcc/2 para corrente =0
    sensorValue_aux = (analogRead(sensorACS712) -511.5);

    // somam os quadrados das leituras (É valido para DC e AC).
    valorSensorACS712 += pow(sensorValue_aux,2);

```

```

//-----CORRENTE DC-----
//Somente para medir corrente DC
//valorSensorACS712 += sensorValue_aux ;

//LEITURA DO VALOR NA PORTA ANALÓGICA(VARIA DE 0 ATÉ 1023)
valorTensaoDC = analogRead(sensorTensaoDC);
//CALCULA O VALOR A PARTIR DA RESOLUÇÃO DO ADC
valorTensaoDC =(valorTensaoDC*voltsporUnidade);
//INCLUE NO CALCULO OS VALORES DO DIVISOR DE TENSÃO
mediaTotalTensaoDC = mediaTotalTensaoDC+ (valorTensaoDC /
(R2/(R1+R2)));

//UM PEQUENO INTERVALO ENTRE AS LEITURAS
delay(1);
}

// CALCULO QUE MEDE A CORRENTE MÉDIA
// finaliza o calculo da méida quadratica e ajusta o valor lido para volts
valorSensorACS712 = (sqrt(valorSensorACS712/ amostragem)) *
voltsporUnidade;

//-----CORRENTE DC-----
//Somente para medir corrente DC
//valorSensorACS712 = (valorSensorACS712/ amostragem) *
voltsporUnidade;

// calcula a corrente considerando a sensibilidade do sernsor (100 mV por
amper)
valorCorrente = (valorSensorACS712/sensibilidade);
//CASO A CORRENTE OU TENSAO SEJA NULA (ZERO)
//NAO IMPRIME A POTENCIA (WATTS)
if(valorCorrente <= desvioACS712){
valorCorrente =0; }

```

```
//RETIRA A MEDIA DOS VALORES DE LEITURA  
valorFinalTensaoDC = mediaTotalTensaoDC / amostragem;
```

```
//POSICIONA NA PRIMEIRA LINHA E PRIMEIRA COLUNA  
//IMPRIME A TENSÃO
```

```
//ESCREVE  
Serial.print("TENSÃO :");  
Serial.print(valorFinalTensaoDC ,1);  
Serial.println(" V");
```

```
//POSICIONA NA SEGUNDA LINHA E PRIMEIRA COLUNA  
//IMPRIME A CORRENTE
```

```
//ESCREVE  
Serial.print("CORRENTE :");  
Serial.print(valorCorrente);  
Serial.println(" A");
```

```
if((valorCorrente > 0) && (valorFinalTensaoDC > 1.15))  
{
```

```
//ESCREVE  
Serial.print("POTENCIA :");  
Serial.print(valorCorrente * valorFinalTensaoDC);  
Serial.println(" W");  
}
```

```
delay(1000);  
}
```



Technical Data Sheet for TG12-8

Single-Stage Thermoelectric Generator



NOMINAL PERFORMANCE IN NITROGEN

Cold Side Temperature (°C)	27±2
AC Resistance (ohms):	1.36 – 1.69
Device ZT	0.73

PRODUCT FEATURES

- RoHS EU Compliant
- Rated operating temperature of 200°C.
- Ceramic Material: Aluminum Oxide
- Porch configuration for high strength leadwire connection.
- Superior nickel diffusion barriers on elements.
- High strength for rugged environment.
- RTV sealing option available.
- Lapped option available for multiple module applications.

ORDERING OPTIONS

Model Number	Description
TG12-8-01	Leadwires
TG12-8-01L	Leadwires, Lapped
TG12-8-01S	Leadwires, Sealed
TG12-8-01LS	Leadwires, Lapped, Sealed
TG12-8-01G	Leadwires, Graphite Pads
8-01LG	Leadwires, Lapped, Graphite Pads
TG12-8-01SG	Leadwires, Sealed, Graphite Pads
TG12-8-01LSG	Leadwires, Lapped, Sealed, Graphite Pads

OPERATION

For maximum reliability, continuous operation below 200°C (cold side and hot side) is recommended. Intermittent operation up to 230°C on the hot side of the TG is permissible.

For maximum reliability, continuous operation below 200°C (cold side and hot side) is recommended. Intermittent operation up to 230°C on the hot side of the TG is permissible.

INSTALLATION

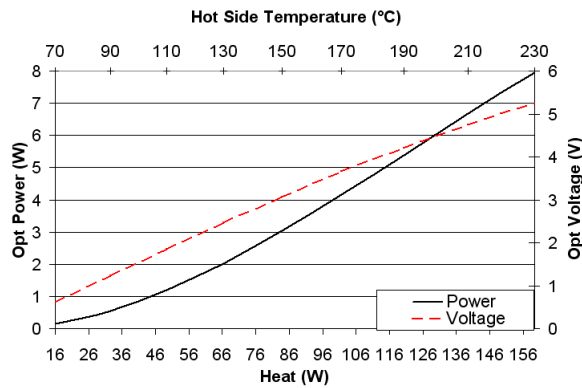
Recommended mounting methods: Clamp with uniform pressure to a flat surface with thermal interface material. Recommended 1.4 MPa (200 psi) with thermal grease or flexible graphite pads. For additional information, please contact an applications engineer.

Recommended mounting methods: Clamp with uniform pressure to a flat surface with thermal interface material. Recommended 1.4 MPa (200 psi) with thermal grease or

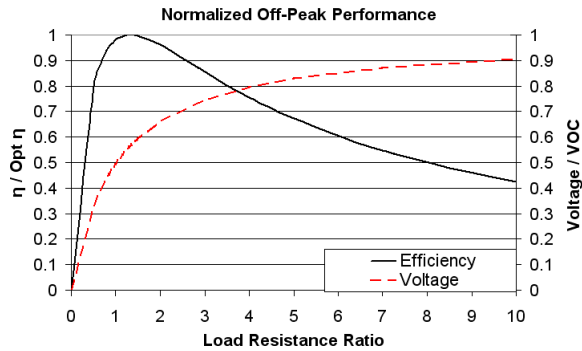
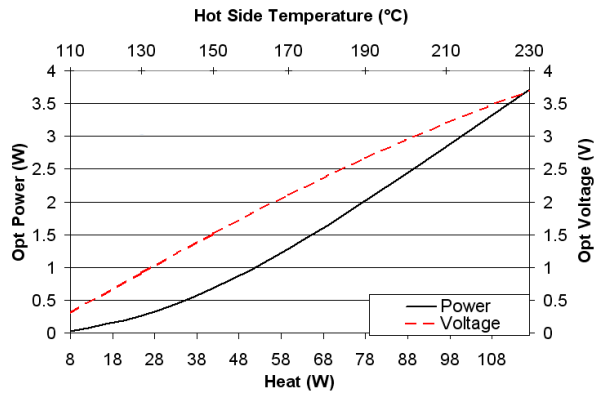
POWER GENERATION PERFORMANCE CURVES

ENVIRONMENT: ONE ATMOSPHERE DRY NITROGEN

Cold Side Temperature 50°C



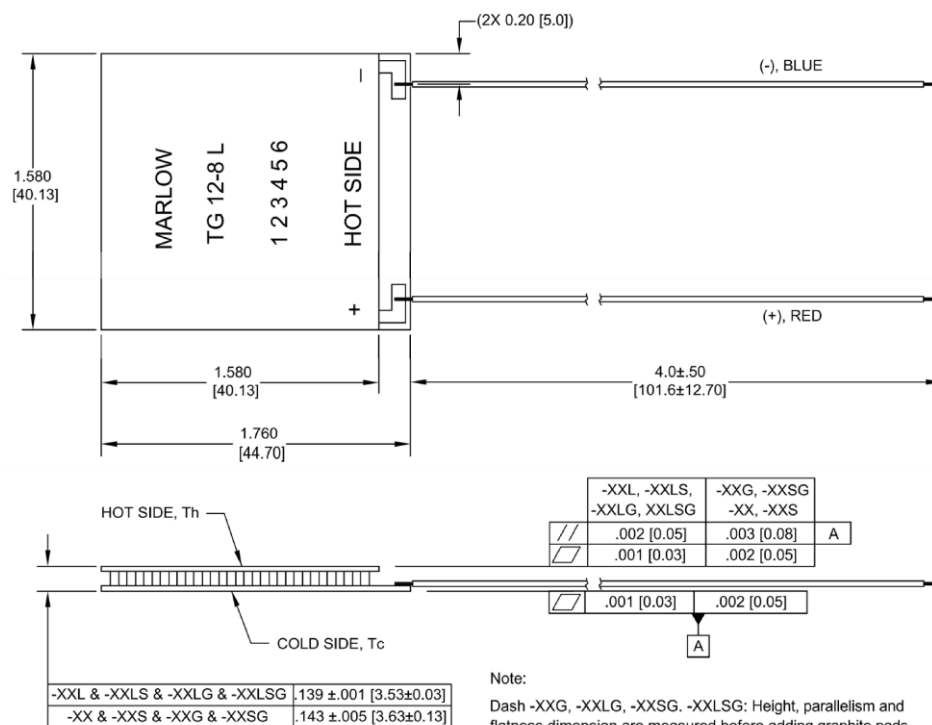
Cold Side Temperature 100°C



Hot Side Temperature (°C)	230	170	110
Cold Side Temperature (°C)	50	50	50
Optimum Efficiency, η (%)	4.97	4.08	2.39
Optimum Power (W)	7.95	4.17	1.19
Optimum Voltage (V)	5.25	3.65	1.86
Load Resistance for Opt η (Ω)	3.46	3.20	2.90
Open Circuit Voltage, VOC (V)	9.43	6.48	3.27
Closed Circuit Current (A)	3.38	2.60	1.48
Thermal Resistance (°C/W)	1.13	1.17	1.20

For performance information in a vacuum or with cold side temperatures other than 50°C or 100°C, contact one of our Applications Engineers at 877-627-5691.

MECHANICAL CHARACTERISTICS



Anexo C – Tabela de custos para a construção do protótipo do fogão termoelétrico

MATERIAIS	VALOR (R\$)
Chapa de Zinco 100 cm x 100 cm x 0,3 mm	85,0
Caixa de Madeira (MDF) 3 mm	30,0
Haste de Alumínio 10 cm	50,0
Dissipador de Calor de Alumínio 50 x 50 mm	56,5
Módulo Termoelétrico TG12-8	263,7
Bateria de Lítio Recarregável 18650	49,4
Módulo Carregador Bateria 1s Step Up	40,0
Cooler Radial 5V	35,0
Total	609,60