



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

EVELLYNE LUCKWÜ

**AVALIAÇÃO DE MÓDULOS TERMOELÉTRICOS COMO DISPOSITIVO DE  
RECUPERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA**

Recife

2021

EVELLYNE LUCKWÜ

**AVALIAÇÃO DE MÓDULOS TERMOELÉTRICOS COMO DISPOSITIVO DE  
RECUPERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Costa Araújo.

Recife  
2021

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

L941a Luckwü, Evellyne.  
Avaliação de módulos termoelétricos como dispositivo de recuperação de energia térmica / Evellyne Luckwü. - 2021.  
76 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Costa Araújo.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia Mecânica, 2021.  
Inclui Referências, Apêndice e Anexo.

1. Engenharia mecânica. 2. Gerador termoelétrico. 3. Calor residual. 4. Células de Peltier. 5. Motor de combustão interna. I. Araújo, Marcus Costa (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2021- 229

EVELLYNE LUCKWÜ

**AVALIAÇÃO DE MÓDULOS TERMOELÉTRICOS COMO DISPOSITIVO DE  
RECUPERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em:  07 / 05 / 2021 .

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Marcus Costa Araújo. (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Jacek Stanislaw Michalewicz (Examinador Externo)  
Instituto Federal de Pernambuco

*Dedico a minha família, que sempre com muito carinho e compreensão me apoiaram em todos os momentos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família por sempre estarem ao meu lado, principalmente meus pais Glaucineide Maria Luckwü e Romualdo Luckwü da Silva por sempre serem compreensivos, pacientes e apoiando incondicionalmente, obrigada de coração, amo vocês. Agradeço ao meu orientador Marcus pelo incentivo e auxílio nas atividades desenvolvidas, principalmente na parte prática no auxílio dos testes e na normalização deste trabalho de conclusão de curso, na qual seus conhecimentos foram de grande ajuda e aprendizado. Agradeço anos meus amigos e colegas de cursos, no qual me ajudaram, incentivaram e mesmo em meio as dificuldades sempre me motivavam a seguir, não vou citar nomes para não esquecer ninguém, mas desde já obrigada por tudo.

"Eu não me preocupo que eles roubem a minha ideia... eu me preocupo que eles não tenham suas próprias"(TESLA, 1891).

## RESUMO

Os motores de combustão interna são conhecidos por terem rendimento relativamente baixo comparado a outros tipos de sistemas de geração de energia. Apenas cerca de 25% da energia liberada pela combustão é realmente utilizada para fins de mobilidade e acionamento elétrico de acessórios dos automóveis. A maior parte das perdas deste tipo de motor se dá através do sistema de exaustão e do sistema de arrefecimento do motor - cerca de 40% e 30% respectivamente. A busca por combustíveis mais limpos, por fontes renováveis de energia e até por formas de aproveitar os resíduos energéticos dispensados em outros processos tem ganhando interesse crescente na literatura. Neste campo de aproveitamento de energia, uma área muito promissora é a recuperação de calor residual através do uso de geradores termoelétricos. Estes módulos termoelétricos que trabalham como geradores termoelétricos funcionam através do efeito Seebeck - Peltier, quando aplicado um diferencial de temperatura, o mesmo gera uma potência elétrica. Os módulos termoelétricos são a melhor escolha para geração de energia a partir de calor residual se a temperatura do sistema estiver abaixo de 150°C, apesar de apresentarem baixa eficiência, são mais confiáveis por não possuírem partes móveis, proporcionando um funcionamento livre de vibrações, e por possuírem o tamanho e peso reduzidos. Neste trabalho, foi desenvolvido um gerador termoelétrico simples. Tal protótipo foi projetado para ser acoplado ao sistema de exaustão de um motor de combustão interna a diesel. O sistema consiste na utilização de células de Peltier para a conversão da energia térmica gerada pelos gases de exaustão de um motor de combustão interna em energia elétrica. Desta forma pode-se obter um aumento da eficiência geral.

Palavras-chave: gerador termoelétrico; calor residual; células de Peltier; Motor de combustão interna.

## **ABSTRACT**

Internal combustion engines are known to have relatively low performance compared to other types of power generation systems. Only about 25 % of the energy released by combustion is actually used for the purposes of mobility and electric drive of car accessories. Most of the losses of this type of engine occur through the exhaust system and the engine cooling system - about 40 % and 30 % respectively. The search for cleaner fuels, renewable sources of energy and even ways to take advantage of the energy residues dispensed in other processes has gained increasing interest in the literature. In this field of energy use, a very promising area is the recovery of residual heat through the use of thermoelectric generators. These thermoelectric modules that work as thermoelectric generators work through the Seebeck - Peltier effect, when a temperature differential is applied, it generates an electrical power. Thermoelectric modules are the best choice for generating energy from residual heat if the system temperature is below 150 ° C, despite having low efficiency, they are more reliable because they have no moving parts, providing vibration-free operation, and because of their reduced size and weight. In this work, a simple thermoelectric generator was developed. This prototype was designed to be coupled to the exhaust system of a diesel internal combustion engine. The system consists of using Peltier cells to convert the thermal energy generated by the exhaust gases of an internal combustion engine into thermal energy.

Keywords: thermoelectric generator; residual heat; peltier cells; internal combustion engine.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dissipação energética de um motor de combustão interna . . . . .	16
Figura 2 – Sistema de escape com um TEG acoplado . . . . .	22
Figura 3 – Modelo do TEG utilizado pela BMW . . . . .	22
Figura 4 – Evolução da potência obtida pela BMW em 2011 . . . . .	23
Figura 5 – Relação entre a velocidade do veículo, potência obtida e consumo de combustível . . . . .	23
Figura 6 – Design proposto de cogeração . . . . .	24
Figura 7 – Modelo de Termopar . . . . .	26
Figura 8 – Esquema do efeito Seebeck de um par termoelétrico . . . . .	28
Figura 9 – Valores de Variação do Coeficiente de Seebeck em relação a Temperatura . . . . .	29
Figura 10 – Esquema do efeito Peltier em um par termoelétrico . . . . .	29
Figura 11 – Gerador termoelétrico composto por um termopar de um estágio . . . . .	30
Figura 12 – Figura de Mérito Vs temperatura de algumas ligas . . . . .	33
Figura 13 – Materiais termoelétricos agrupados de acordo com a sua gama de temperaturas de operação . . . . .	34
Figura 14 – Gerador termoelétrico multi-segmentado . . . . .	35
Figura 15 – Esquema básico de um dispositivo de conversão termoelétrica . . . . .	36
Figura 16 – Módulo termoelétrico . . . . .	36
Figura 17 – Fluxos de massa e energia em um motor de combustão interna . . . . .	38
Figura 18 – Corte longitudinal de um motor a ciclo Otto de 4 tempos . . . . .	39
Figura 19 – Quatro tempos de um motor a ciclo Otto . . . . .	40
Figura 20 – Quatro tempos de um motor a ciclo Diesel . . . . .	41
Figura 21 – Caminho energético típico da gasolina em um veículo com motor de combustão interna . . . . .	42
Figura 22 – Esquema elétrico de um veículo . . . . .	43
Figura 23 – Esquema de um sistema de escape automotivo . . . . .	44
Figura 24 – Fluxograma da metodologia . . . . .	46
Figura 25 – Modelo do protótipo . . . . .	48
Figura 26 – Dimensões do Módulo Termoelétrico . . . . .	49
Figura 27 – Protótipo de gerador termoelétrico . . . . .	50
Figura 28 – Dimensões dos Dissipadores de Calor . . . . .	51
Figura 29 – Junção das células de Peltier com os dissipadores de calor . . . . .	51
Figura 30 – Acoplamento das células com os dissipadores de calor na base do protótipo . . . . .	52
Figura 31 – Fluxograma de fabricação da base protótipo . . . . .	52
Figura 32 – Base do protótipo . . . . .	53
Figura 33 – Base do protótipo isolado com a manta térmica . . . . .	53
Figura 34 – Teste de bancada do protótipo utilizando um soprador térmico . . . . .	54

Figura 35 – Realização das medições dos dados . . . . .	55
Figura 36 – Ligação realizada nos módulos termoelétricos. . . . .	55
Figura 37 – Gráfico Tensão e corrente X $\Delta T$ para o primeiro nível de Temperatura . . .	59
Figura 38 – Gráfico Tensão X Quantidade de células de Peltier para o primeiro nível de Temperatura . . . . .	60
Figura 39 – Gráfico Tensão e corrente X $\Delta T$ para o segundo nível de Temperatura . . .	61
Figura 40 – Gráfico Tensão X Quantidade de células de Peltier para o segundo nível de Temperatura . . . . .	62
Figura 41 – Gráfico Tensão X $\Delta T$ para o terceiro nível de Temperatura . . . . .	63
Figura 42 – Gráfico Tensão X Quantidade de células para o terceiro nível de Temperatura	64
Figura 43 – Gráfico Tensão X $\Delta T$ para as duas configurações . . . . .	65
Figura 44 – Gráfico Corrente X $\Delta T$ para as duas configurações . . . . .	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de Termopares Comerciais . . . . .	28
Tabela 2 – Especificações do Módulo Termoelétrico TEC1-12706 . . . . .	49
Tabela 3 – Média dos dados obtidos para a primeira configuração com 5 células de Peltier	57
Tabela 4 – Média dos dados obtidos para a primeira configuração com 5 células de Peltier	58
Tabela 5 – Tabela Resultados da simulação da unidade . . . . .	58
Tabela 6 – Resultados obtidos para a primeira análise . . . . .	63
Tabela 7 – Dados obtidos para $\Delta T = 886,60^{\circ}\text{C}$ . . . . .	66
Tabela 8 – Dados obtidos das duas configurações com 5 e 10 células de Peltier . . . . .	73

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

COP	Coeficiente de Performance
MCI	Motor de combustão interna
TEG	Gerador termoelétrico
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
IFPE	Instituto Federal de Pernambuco

## LISTA DE SÍMBOLOS

Notação	Descrição	Unidade
$\sigma$	Condutividade	$S/m$
$I$	Corrente elétrica	$A$
$\alpha$	Coefficiente de Seebeck	$\mu V/K$
$\pi$	Coefficiente de Peltier	$W/A$ ou $V$
$\lambda'$	Condutividade térmica	$W/mK$
$\Delta T$	Diferença de temperatura	$^{\circ}C$
$\Phi$	Eficiência do gerador	$\%$
$\alpha^2 \sigma$	Fator de potência elétrica	$V^2 S/K^2 m$
$Z_c$	Figura de mérito do termopar	—
$Z_T$	Figura de mérito	$^{\circ}C^{-1}$
$U$	Força eletromotriz gerada	$V$
$P$	Potência elétrica	$W$
$m$	Razão entre resistências elétricas	—
$R$	Resistência elétrica	$\Omega$
$\eta$	Rendimento térmico	—
$T_h$	Temperatura do lado quente	$^{\circ}C$
$T_c$	Temperatura do lado frio	$^{\circ}C$
$\dot{q}$	Taxa de aquecimento	$W/s$
$-\dot{q}$	Taxa de resfriamento	$W/s$

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO E CONTRIBUIÇÕES	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	20
2.1	A TERMOELETRICIDADE	20
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	26
3.1	EFEITOS TERMOELÉTRICOS	26
3.1.1	Efeito Seebeck	27
3.1.2	Efeito Peltier	28
3.2	GERAÇÃO TERMOELÉTRICA	30
3.2.1	Figura de Mérito $Z_T$	30
3.2.2	Materiais Termoelétricos	33
3.2.3	Módulos Termoelétricos	34
3.3	MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	37
3.3.1	Motor Ciclo Otto	38
3.3.2	Motor Ciclo Diesel	40
3.3.3	Perdas de Energia	41
3.4	SISTEMA ELÉTRICO AUTOMOTIVO	42
3.4.1	Bateria	43
3.4.2	Alternador	43
3.4.3	Motor de Partida	43
3.4.4	Retificador de Corrente	44
3.5	SISTEMA DE ESCAPAMENTO AUTOMOTIVO	44
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	46
4.1	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	47
4.2	DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA	47
4.3	DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS	48
4.3.1	Especificação dos Módulos	48
4.3.2	Fonte de Calor	50
4.4	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	50

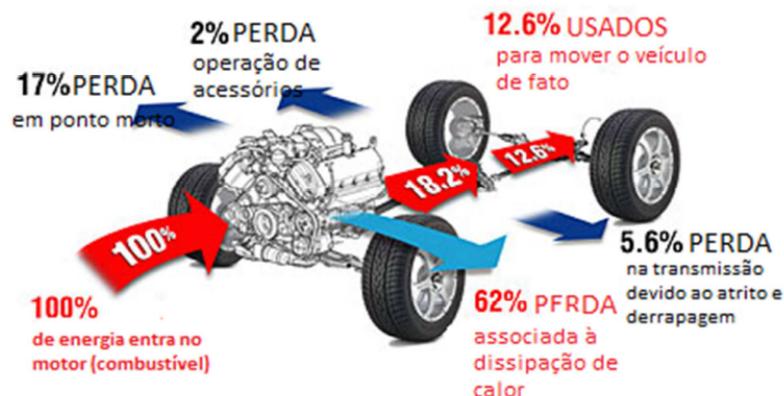
4.5	COLETA DE DADOS .....	53
4.6	TESTE DE BANCADA .....	53
4.7	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	55
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>57</b>
5.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	58
<b>5.1.1</b>	<b>Primeira Análise</b> .....	<b>59</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Segunda Análise</b> .....	<b>63</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE A - TABELA COM TODOS OS DADOS COLETADOS</b> .....	<b>73</b>
	<b>ANEXO A - DATASHEET DO FABRICANTE</b> .....	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a grande utilização dos carros com motores de combustão interna (MCI), a dependência pelos combustíveis fósseis vem crescendo cada vez mais. Devido ao aquecimento global, existe atualmente uma grande preocupação por parte de organizações mundiais com o meio ambiente. Principalmente com as emissões de  $CO_2$  aliados à necessidade de economizar energia, aumentar a eficiência dos automóveis e reduzir o consumo de combustíveis fósseis (SOUZA, 2011). A atual crise energética e os impactos ambientais provocados pelo consumo extensivo de combustíveis fósseis tornaram-se desafios a serem superados no século XXI. Em meio a esse cenário de aquecimento global e com os avanços tecnológicos, a busca por combustíveis mais limpos, por fontes renováveis de energia e até por formas de aproveitar os resíduos energéticos dispensados em outros processos tem ganhando interesse crescente na literatura (BERMANN, 2008).

Sabe-se que os automóveis atuais possuem várias funcionalidades e recursos extras, como por exemplo, ar condicionado, GPS, painel eletrônico, sistema de áudio, sistema de vídeo, entre outros. Sendo assim, todos esses exemplos citados são responsáveis por um elevado consumo de energia elétrica. Como a maioria dos automóveis possuem motores de combustão interna, esses recursos quando instalados em um veículo com esse tipo de motor, representarão um aumento de carga mecânica do motor, ou seja, a utilização destes recursos refletem em um aumento do consumo de energia elétrica que necessita ser produzida retirando energia mecânica do motor (AFONSO, 2014). Com isso, verifica-se o aumento no consumo do combustível fóssil e conseqüentemente o aumento na emissão dos gases poluentes. (AFONSO, 2014).

Figura 1 – Dissipação energética de um motor de combustão interna



Fonte: Dutra e Melo (2014)

Os motores de combustão interna são conhecidos por terem rendimento relativamente baixo comparado a outros tipos de sistemas de geração de energia (YANG, 2005). Apesar dos esforços para aumentar a eficiência dos MCI, nos veículos modernos mais de 62% da energia

liberada pela combustão é desperdiçada no sistema de exaustão e arrefecimento do motor, e o restante representa a potência mecânica fornecida (WILL; BORETTI, 2011). Esse número é muito elevado, o que torna os MCI muito ineficientes na conversão de energia química para energia mecânica. A Figura 1 mostra todas as perdas geradas em um automóvel, no qual observa-se que grande parte da energia produzida é desperdiçada sob forma de calor. Como apenas 12,6% da energia gerada é usada para locomover o veículo o aproveitamento do calor dissipado torna-se um campo de aplicação promissor para os geradores termoelétricos (DUTRA; MELO, 2014).

Mais de dois terços da energia consumida pelo automóvel são descarregados para o meio ambiente como calor residual. Hsiao et al. (2010) realizaram uma análise da viabilidade do uso de geradores termoelétricos em duas posições num automóvel, o tubo de escape e o radiador. Nesta análise, verifica-se que o módulo termoelétrico apresenta melhor desempenho no tubo de escape do que no radiador de um automóvel.

Visto isso, é de suma importância que sejam pesquisadas e desenvolvidas novas tecnologias para a redução do consumo de combustíveis fósseis. Um dos principais campos de pesquisas atualmente com este intuito é o reaproveitamento de energia (GRUPPE, 2018). Nesta área de aproveitamento de energia, um campo muito promissor é a termoelectricidade ou recuperação de calor (DUTRA; MELO, 2014). Geradores elétricos comuns utilizam algum tipo de combustível para a produção de energia, um gerador termoelétrico utiliza energia térmica que seria totalmente perdida em um sistema (motor a combustão interna, fornalha, entre outros) como fonte (JUNIOR, 2016).

Atualmente, um dos métodos de recuperação de calor mais promissor é o uso de geradores termoelétricos (CASANO; PIVA, 2011). Os módulos termoelétricos têm ganhando popularidade para as mais variadas aplicações, uma vez que esses dispositivos de estado sólido podem transformar o calor residual emitido por diferentes processos como fábricas, motores de veículos automotivos, computadores ou mesmo de corpos humanos em energia elétrica (ELSHEIKH et al., 2014). Estes módulos termoelétricos que trabalham como geradores termoelétricos funcionam através do efeito Seebeck - Peltier.

Segundo o estudo experimental de módulos termoelétricos para a geração de energia em diversas condições de operação realizado por Chen et al. (2012), os módulos termoelétricos são a melhor escolha para geração de energia a partir de calor residual se a temperatura do sistema estiver abaixo de 150°C. Comparando esses dispositivos com os geradores convencionais, os geradores termoelétricos, apesar de apresentarem baixa eficiência, são mais confiáveis por não possuírem partes móveis, proporcionando um funcionamento livre de vibrações, possuem o tamanho e peso reduzidos (permitindo aplicações em diversas escalas).

Este trabalho tem por objetivo o estudo e avaliação de um gerador termoelétrico para recuperação de energia térmica residual. Um protótipo experimental será desenvolvido e o modelo proposto será avaliado considerando-se uma aplicação automotiva para aproveitamento do calor dos gases residuais.

Com a eminente falta de combustíveis fósseis, a busca por motores mais eficientes vem

crescendo. Por consequência, é promissor estudar novas maneiras de melhorar a eficiência de motores de combustão interna (MCI), de modo a diminuir o consumo dos combustíveis fósseis. Portanto, toda e qualquer pesquisa que busque novas formas de aproveitamento da energia já existente se torna relevante para o mercado atual.

## 1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho possui os seguintes objetivos geral e específicos:

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um protótipo de gerador termoelétrico que permita avaliar a conversão de energia térmica em energia elétrica a partir do aproveitamento do calor residual dos gases de exaustão, validando o modelo matemático termodinâmico desenvolvido por Brito e Araújo (2017).

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta proposta são:

1. Estudar o funcionamento das células de geração termoelétrica (células de Peltier);
2. Construir um protótipo de recuperação de calor com as células de Peltier;
3. Comparar os resultados experimentais obtidos com o protótipo e os resultados teóricos calculados pelo modelo termodinâmico desenvolvido por Brito e Araújo (2017);
4. Avaliar um estudo de caso em uma aplicação da área automotiva.

## 1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO E CONTRIBUIÇÕES

A fim de alcançar os objetivos mencionados na Seção 1.1, o roteiro de execução do trabalho se divide nas etapas sumarizadas a seguir.

- ETAPA 1 - *Proposição do tema*: na fase inicial do projeto, realizou-se uma revisão bibliográfica de artigos e teses pertinentes ao tema escolhido a fim de verificar a sua relevância atualmente.
- ETAPA 2 - *Emprego do modelo matemático*: nesta etapa, iniciou-se a análise do modelo matemático que será utilizado como resultado teórico para realizar a comparação dos resultados teórico e prático.
- ETAPA 3 - *Concepção do protótipo*: a execução desta etapa iniciou-se com a concepção da geometria do protótipo, assim como a escolha e compra dos materiais necessários.

Após a obtenção dos materiais, realizou-se os processos necessários para a montagem do protótipo.

- ETAPA 4 - Emprego do protótipo: com base nos dados obtidos através de testes realizados, em laboratório, com o protótipo obteve-se os resultados práticos que será objeto de análise e comparação com os resultados teóricos.

O documento está estruturado da seguinte forma:

- No Capítulo 1 apresenta-se uma breve introdução ao tema proposto, sua relevância atualmente e os objetivos almejados com o presente trabalho.
- No Capítulo 2 apresenta-se a revisão da literatura do desenvolvimento da tecnologia em foco no presente trabalho ao longo do tempo e também do estado atual da arte. Abrangendo artigos com resultados de pesquisas e pontos de vista diversificados de autores.
- No Capítulo 3, é apresentada a base teórica necessária para o desenvolvimento do projeto. A teoria é dividida nas seguintes partes: primeiramente os conceitos termoelétricos, as equações básicas da termoeletricidade e as que descrevem o comportamento de um módulo termoelétrico; em seguida, apresenta-se a definição e tipos de motores de combustão interna, assim como o sistema elétrico e de exaustão de um veículo automotivo.
- No Capítulo 4, são descritos os materiais adquiridos os fabricados para a montagem do sistema do gerador experimental. O motor estacionário onde os testes serão realizados é apresentado, assim como o acoplamento do gerador termoelétrico (TEG) ao escapamento desse motor. Ainda neste capítulo, o leitor encontrará a descrição do sistema de aquisição de dados montado para a coleta de dados como temperatura, tensão e corrente elétrica durante a realização dos testes.
- No Capítulo 5, os resultados obtidos nos testes são apresentados em forma de tabelas e gráficos. É realizada uma análise comparativa entre os resultados teóricos obtidos e os resultados práticos obtidos através dos experimentos. Avalia-se também as vantagens e desvantagens da utilização de módulos termoelétricos para a recuperação de energia térmica.
- No Capítulo 6, apresentam-se as conclusões obtidas após a realização deste projeto. São revisitadas de forma sumária as principais contribuições do trabalho, elencados possíveis desdobramentos desta tese em trabalhos futuros e citam-se os pontos que podem ser aprimorados futuramente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado uma revisão bibliográfica sobre termopares, materiais termoelétricos, módulos termoelétricos, seus possíveis usos na indústria, e pesquisas realizadas na área automobilística.

### 2.1 A TERMOELETRICIDADE

As primeiras pesquisas sobre termoeletricidade foram na área de refrigeração através da descoberta do efeito Peltier em 1834, no qual dispositivos termoelétricos podem converter energia elétrica em um gradiente de temperatura. A aplicação deste resfriamento ou aquecimento permaneceu mínimo até o desenvolvimento de materiais semicondutores. E com a descoberta desses materiais semicondutores veio a variedade de aplicações (RIFFAT; MA, 2003).

Um dispositivo termoelétrico típico é composto por dois substratos de cerâmica que servem como base e isolamento elétrico para termoelementos de telureto de bismuto tipo P e tipo N que são conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo entre as cerâmicas. (RIFFAT; MA, 2003).

Atualmente é possível encontrar comercialmente com facilidade produtos que utilizam o efeito Peltier, como por exemplo, adegas, caixas de transporte de órgãos, refrigeradores portáteis, entre outros (JUNIOR, 2014). Mas a utilização de módulos termoelétricos voltados para refrigeração está limitada pela sua viabilidade técnica e econômica (JUNIOR, 2016).

Os módulos termoelétricos possuem como vantagens, sua alta durabilidade, volume reduzido e grande precisão, e por se tratar de utilizar uma energia residual, eles podem ser classificados como uma cogeração de energia limpa (ISMAIL; AHMED, 2009). A forma de armazenamento da energia gerada e sua utilização por um pequeno motor elétrico são fatores de projetos essenciais para a obtenção de uma maior eficiência do sistema.

Apesar das várias possibilidades de reaproveitamento de calor residual para fins de refrigeração, os módulos termoelétricos tem se tornado mais barato e mais eficiente segundo as inúmeras pesquisas relativas a módulos termoelétricos nos últimos anos. Com esse aumento nas pesquisas relativas a esses dispositivos, o interesse da indústria por eles tem aumentando bastante e não apenas na área automobilística (JUNIOR, 2016).

O potencial de geração de energia termoelétrica através da recuperação de calor residual, utilizada para deslocar alternadores ou fornecer carga adicional para uma bateria automotiva aumentou com os avanços nos materiais termoelétricos (SAQR et al., 2008).

Geradores termoelétricos baseados em exaustão (ETEG) tem sido o foco das aplicações em veículos movidos a gasolina desde o final dos anos 1980. Esse enfoque se dá porque nos veículos movidos a gasolina, cerca de 40% da energia do combustível é desperdiçada na forma de calor, enquanto que cerca de 30% da energia da combustão é utilizada no sistema de arrefecimento do motor (SAQR et al., 2008).

Segundo Saqr et al. (2008), ainda existem muitos desafios no projeto térmico dos sistemas que utilizam módulos termoelétricos, como por exemplo, aumentar a eficiência dos trocadores de calor, afim de manter uma diferença de temperatura suficiente entre os módulos termoelétricos durante diferentes condições de operação, reduzindo as perdas térmicas através do sistema.

O modelo criado por Junior et al. (2009) quando utilizado dentro da gestão da energia de um automóvel obteve sucesso ao ser aplicado ao sistema de refrigeração ou aquecimento de um carro. Com a melhoria futura de material e sistema pode-se esperar uma melhoria considerável para atingir o nível de eficiência de unidades convencionais de aquecimento/resfriamento de um automóvel. Sistemas como o trocador de calor do protótipo proposto por Junior et al. (2009) pode ser mais aplicável em áreas como pré-resfriamento, auxiliar de sistemas de aquecimento ou resfriamento local.

Nos automóveis, no que diz respeito a redução das emissões de  $CO_2$ , a geração eficiente de temperaturas quentes e frias e o uso inteligente do calor residual é de extrema importância para os fabricantes de automóveis. Logo, a termoeletricidade pode ser um componente vital em automóveis (JUNIOR et al., 2009). A forma de armazenamento da energia gerada e sua utilização por um pequeno motor elétrico são fatores de projetos essenciais para a obtenção de uma maior eficiência do sistema (DUTRA; MELO, 2014).

Apesar do baixo rendimento desses sistemas, já é uma realidade no mercado de veículos híbridos, com sistemas de refrigeração completamente elétricos. Nesses sistemas, um compressor elétrico é ligado a uma bateria cujo carregamento é feito através do alternador já presente no veículo. Outro desafio referente à aplicação desses geradores termoelétricos alimentados por gases de exaustão em sistemas de refrigeração automotivos é o desacoplamento da correia que alimenta o compressor do MCI do automóvel e sua alimentação através da energia gerada (DUTRA; MELO, 2014).

Grandes empresas automobilísticas também estão pesquisando nesta área. A Volkswagen e a Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr tem como objetivo implementar um gerador capaz de alimentar todos os dispositivos elétricos de um automóvel Volkswagen Golf. Outra grande empresa que também investe em pesquisas nessa área é a Honda (JUNIOR, 2014).

Na indústria automobilística, as fabricantes BMW, Ford e GM já realizaram diversos estudos de implementação da termoeletricidade para fornecimento de energia a bordo. Os pontos mais estudados são o desenvolvimento de materiais que possam ser submetidos a altas temperaturas sem perdas na sua eficiência, já que esses geradores podem atingir cerca de  $500^{\circ}C$ , e que possam ser produzidos em grandes quantidades de forma mais barata. Eles também buscam melhores soluções para o acoplamento do dispositivo ao veículo (EDER; LINDE, 2011). Atualmente, o aparelho é inserido no sistema de escape, como pode ser visualizado na Figura 2.

A BMW vem pesquisando nessa área desde 2003, e eles conseguiram obter 80W através de um gerador termoelétrico, e em 2011 chegaram a um modelo capaz de gerar mais de 600W, como pode ser visto na Figura 3 (EDER; LINDE, 2011).

Figura 2 – Sistema de escape com um TEG acoplado



Fonte: Eder e Linde (2011)

Figura 3 – Modelo do TEG utilizado pela BMW



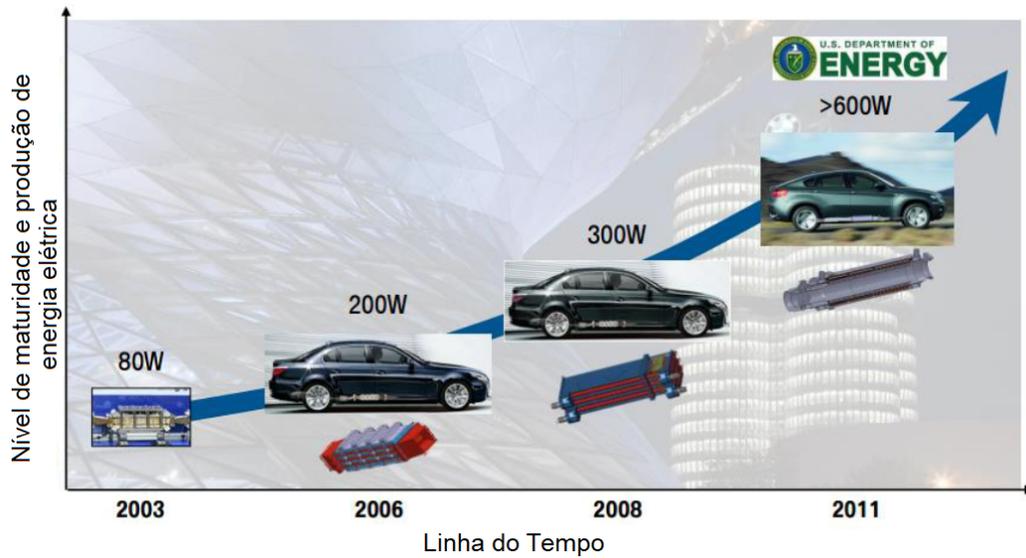
Fonte: Eder e Linde (2011)

Na Figura 4 observa-se que ao se utilizar o modelo da BMW X6 TEG, mostrado na Figura 3, com o carro em um funcionamento estável à uma velocidade média de 100 km/h obtém-se um resultado aproximado de 350W de energia, e cerca de 0,7% de melhora no consumo de combustível.

Também há uma relação entre a velocidade do automóvel e a quantidade de energia gerada pelo gerador termoelétrico. Observa-se na Figura 5 a relação entre a velocidade do veículo com a potência obtida pelo gerador e o consumo de combustível. Pode-se ver que quanto maior a velocidade do automóvel maior será a produção de energia no gerador, e há um

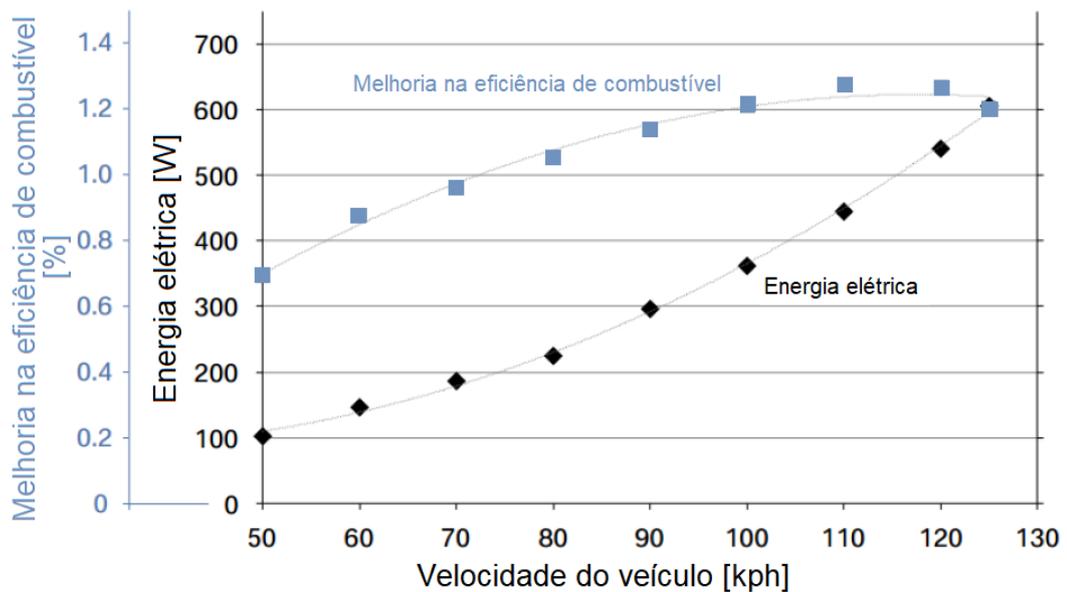
aumento na eficiência no consumo de combustível. Esse aumento ocorre porque a velocidade está diretamente ligada a rotação do motor, logo, quanto maior a rotação maior será o fluxo de gases, e conseqüentemente maior a transferência de calor para o gerador (JUNIOR, 2016).

Figura 4 – Evolução da potência obtida pela BMW em 2011



Fonte: Adaptado de Eder e Linde (2011)

Figura 5 – Relação entre a velocidade do veículo, potência obtida e consumo de combustível



Fonte: Adaptado de Kranenburg Junior (2016)

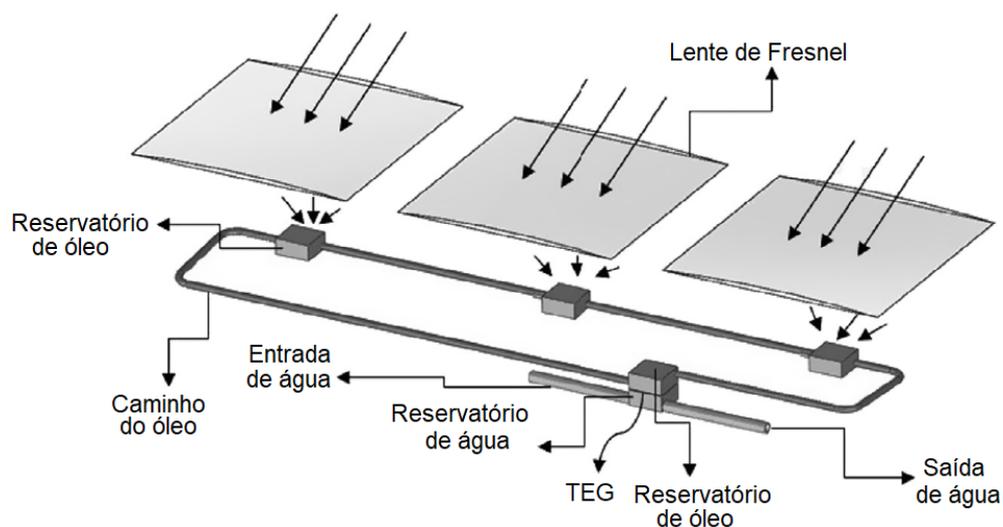
Segundo Saqr et al. (2008) há quatro fatores principais que influenciam diretamente a eficiência térmica de um gerador termoelétrico alimentado por gases de exaustão. São eles:

- O material do trocador de calor.
- O sistema de arrefecimento do gerador.
- O local de instalação do gerador.
- A geometria do trocador de calor.

Módulos termoelétricos também podem ser aplicados em outras áreas além da área automotiva. Nia et al. (2014) desenvolveu um estudo sobre a utilização de módulos termoelétricos e lente de Fresnel para a cogeração. Este trabalho investigou o sistema de cogeração por termoelectricidade, no qual a lente de Fresnel e o módulo termoelétrico foram utilizados para concentrar o feixe solar para gerar energia elétrica, a luz elétrica é concentrada nos módulos termoelétricos a fim de gerar uma diferença de temperatura e consequentemente energia elétrica. O sistema analisado neste trabalho obteve resultados de 1,08 W de potência de saída com 51,33% de eficiência sob a radiação de 705,9 W de intensidade.

Neste trabalho, a radiação solar é concentrada por uma matriz de lentes de Fresnel para aumentar a intensidade da radiação. O calor absorvido pelo fluido de transferência de calor (óleo mineral) transfere ao reservatório de água que está conectado ao módulo termoelétrico. Os reservatórios de óleo e água fazem a troca de calor no módulo termoelétrico, como esquematizado na Figura 6.

Figura 6 – Design proposto de cogeração



Fonte: Adaptado de Nia et al. (2014)

Nunes e Barbosa (2017) analisou o efeito Seebeck no aumento da eficiência de uma caldeira. Esse estudo testou a eficácia de um tipo de cogeração de energia composto por módulos termoelétricos aplicado sobre a saída dos gases de exaustão em uma caldeira hospitalar a fim de aumentar sua eficiência. O sistema irá trabalhar com temperaturas de no máximo 200°C, no qual

o calor obtido dos gases é transferido para o lado quente dos módulos termoelétricos através de chapas de alumínio de 1mm.

Santos e Spinelli (2019) desenvolveu um estudo sobre a utilização de um TEG na recuperação de energia residual no processo de fabricação de aços. Os módulos utilizados são feitos de óxido de manganês e óxido de cálcio. Esses módulos irão converter o calor das placas de aço 1045, no final do processo de lingotamento contínuo, em energia elétrica. Esse estudo obteve bons resultados, no qual, ao se considerar placas com 400mm de espessura e 1050°C de temperatura, a uma velocidade de 0,3 m/min, estimou-se que o sistema foi capaz de gerar energia capaz de abastecer 23 residências brasileiras. O módulo TEG escolhido foi o CMO-32-62s fabricado pela TECTEG MFR, que é composto de 32 pares termoelétricos de junção P-N. O conjunto foi formado por 1250 módulos TEG ligados em série.

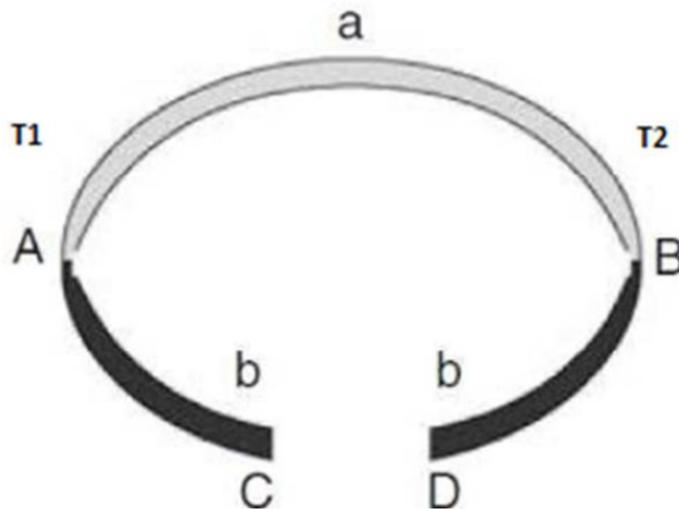
### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão nos conceitos termoelétricos, as equações básicas da termoeletricidade e as que descrevem o comportamento de um módulo termoelétrico, os conceitos de motores de combustão interna e a descrição do sistema elétrico de um automóvel.

#### 3.1 EFEITOS TERMOELÉTRICOS

Pode-se demonstrar os efeitos termoelétricos utilizando um termopar de acordo com a Figura 7. Um termopar é uma junção metálica de duas substâncias diferentes, ou ligas metálicas, e quando estimulado por uma energia externa, geralmente uma variação de temperatura, produz um sinal analógico de corrente ou tensão (CHEN et al., 2012). Geralmente a tensão gerada é muito pequena, da ordem de micro-volts por grau de variação de temperatura ( $\mu$  V/K). Na Figura 7 tem-se dois metais semicondutores distintos **a** e **b**, que estão interligados através das junções **A** e **B**, estes terminais são ligados termicamente em paralelo e eletricamente em série. Pode-se também visualizar os terminais **C** e **D** do termopar e as temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ , que são as temperaturas quente e fria, respectivamente.

Figura 7 – Modelo de Termopar



Fonte: Adaptado de Rowe (2006)

Os materiais termoelétricos começaram a ser estudados por volta do século XIX. Em 1821, Thomas Seebeck constatou que certos materiais, quando submetidos a uma diferença de temperatura produziam tensão elétrica, esse fenômeno passou a ser conhecido como efeito Seebeck. O efeito contrário foi observado em 1834 por Jean Charles Athanase Peltier, no qual ao submeter uma junta formada por diferentes materiais condutores a uma tensão elétrica, forma-se uma diferença de temperatura entre a junção, esse efeito ficou conhecido como efeito Peltier. A princípio esses dois efeitos não foram relacionados, mas vinte anos depois da descoberta do

efeito Peltier, Willian Thompson publicou um estudo relacionando os efeitos Seebeck e Peltier, que ficou conhecido como o efeito Seebeck-Peltier (DUTRA; MELO, 2014).

Ao longo do tempo, esses efeitos foram estudados por diversos cientistas, e um dos grandes desafios encontrados foi a deficiência de estudos na área de materiais semicondutores. Com o desenvolvimento tecnológico e a necessidade de se produzir energia de forma limpa e eficiente, novos estudos têm surgido nessa área. É possível encontrar aplicações dos módulos termoelétricos na refrigeração de unidades móveis como mini-refrigeradores ou coolers, nas quais o peso e o ruído devem ser minimizados, ou como gerador termoelétrico, aproveitando as altas temperaturas dos gases de exaustão de um motor (DUTRA; MELO, 2014).

### 3.1.1 Efeito Seebeck

O efeito Seebeck pode ser descrito utilizando como base o termopar apresentado na Figura 7. Quando se submete as junções **A** e **B** a diferentes temperaturas  $T_1$  e  $T_2$  e  $T_1 > T_2$ , uma força eletromotriz **U** é gerada, e a mesma se desenvolve entre os terminais C e D do termopar e é dado pela Equação 3.1.

$$U = \alpha_{ab}(T_1 - T_2) \quad (3.1)$$

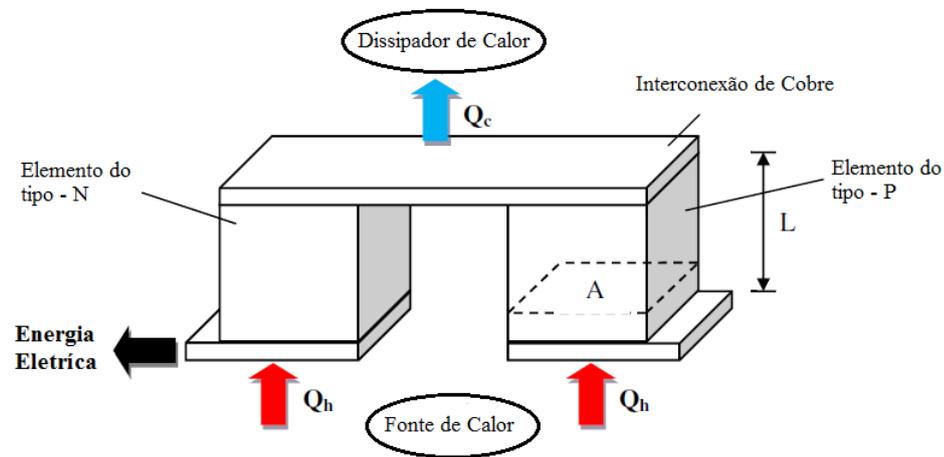
Onde:

$$\alpha_{ab} = \alpha_a - \alpha_b \quad (3.2)$$

Em que  $\alpha$  é o coeficiente de Seebeck, e as vezes pode ser representado pela letra **S**. O sinal de  $\alpha$  é dado pela direção da corrente elétrica no termopar que é induzida pela força eletromotriz. Quando a corrente segue no sentido horário o sinal de  $\alpha$  é positivo e é negativo quando o sentido for anti-horário. Usualmente o coeficiente de Seebeck é medido em  $\mu$  V/K.

A conversão de energia térmica para energia elétrica ocorre devido ao efeito Seebeck, que é uma propriedade intrínseca de um material ou par de materiais. A energia gerada por este efeito, no entanto, depende das propriedades dos materiais e para a maioria dos materiais é pequena ao ponto de ser irrelevante. Quando as junções do termopar são submetidas a temperaturas diferentes, uma força eletromotriz, ou seja, uma diferença de potencial é gerada. Este efeito é conhecido por ser o oposto ao efeito Peltier. Uma de suas junções é colocada onde se deseja determinar a temperatura enquanto a outra é mantida a uma temperatura constante, geralmente a temperatura utilizada é o ponto de fusão do gelo. Sabendo-se o coeficiente de Seebeck do termopar, a temperatura pode ser obtida através da força eletromotriz gerada. O esquema do Efeito Seebeck em um termopar pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Esquema do efeito Seebeck de um par termoelétrico



Fonte: Adaptado de Chen et al. (2015)

Termopares baseados no efeito Seebeck são usados para medições em uma ampla faixa de temperaturas (CHEN et al., 2015). A Tabela 1 mostra o coeficiente de Seebeck de termopares comerciais a 20°C (DUTRA; MELO, 2014).

Tabela 1 – Coeficientes de Termopares Comerciais

Tipo de Termopar	Metais da Junção	Coeficiente Seebeck a 20°C [ $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ]
E	Cromel/Constantan	62
J	Fe/Constantan	51
K	Cromel/Alumel	40
R	Pt/Pt+13%Rd	7
S	Pt/Pt+10%Rd	7
T	Cu/Constantan	40

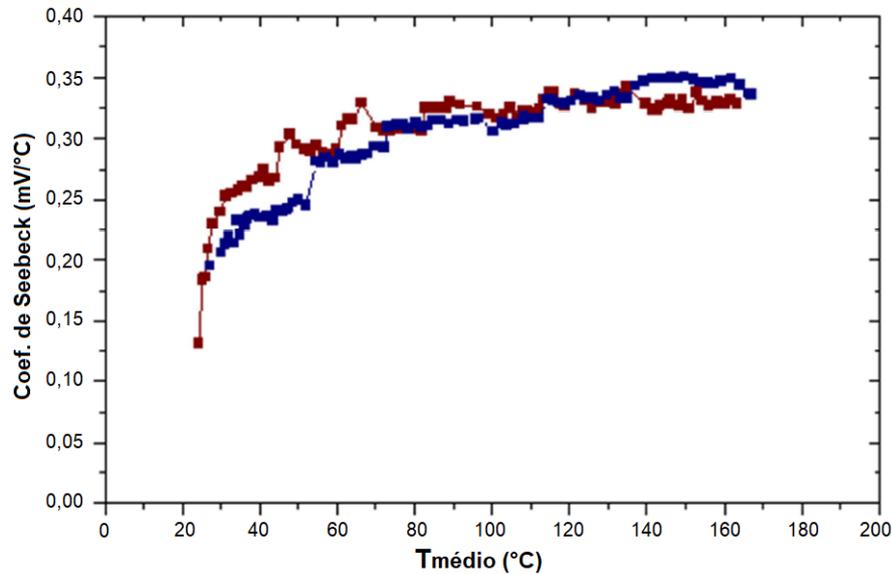
Fonte: Dutra e Melo (2014)

Couto e Alves (2010) realizaram um estudo para obter a medida da variação do coeficiente Seebeck com a mudança de temperatura utilizando materiais a base de Si-Ge. A Figura 9 representa duas medidas consecutivas realizadas, onde cada cor representa uma medida.

### 3.1.2 Efeito Peltier

O efeito Peltier se dá ao contrário do efeito Seebeck, ou seja, uma força eletromotriz externa é aplicada entre os terminais **C** e **D** do termopar (de acordo com a Figura 7), gerando uma corrente **I** que flui ao longo do circuito. Essa corrente produz uma taxa de aquecimento ( $\dot{q}$ ) em uma das junções e uma taxa de resfriamento ( $-\dot{q}$ ) na outra junção. Logo, define-se o coeficiente de Peltier ( $\pi_{ab}$ ) de acordo com a Equação 3.3.

Figura 9 – Valores de Variação do Coeficiente de Seebeck em relação a Temperatura



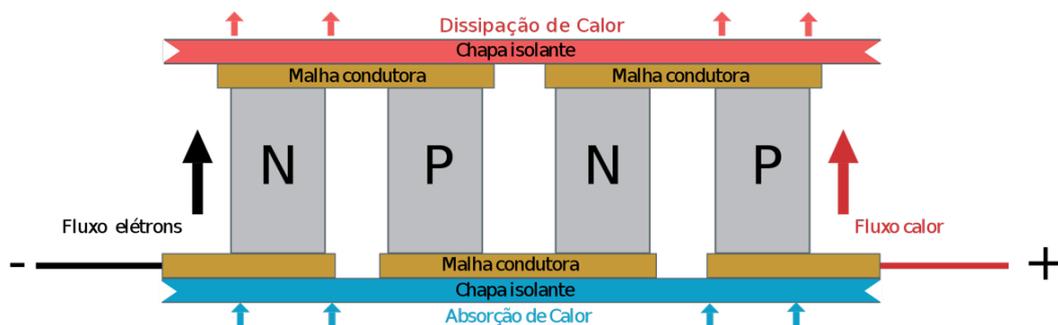
Fonte: Couto e Alves (2010)

$$\pi_{ab} = \frac{I}{\dot{q}} \quad (3.3)$$

A unidade de medida do coeficiente de Peltier ( $\pi_{ab}$ ) é Watts por Ampère (W/A) ou Volts (V)

O efeito Peltier ocorre quando uma diferença de temperatura é gerada por uma diferença de potencial elétrico. Os dois efeitos são considerados como um só, o chamado efeito Peltier-Seebeck, e ambos podem ser observados nos dispositivos de conversão termoelétrica, por exemplo, as células de Peltier (MADDUX; TAYLOR, 2013). O esquema do Efeito Peltier em um termopar pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Esquema do efeito Peltier em um par termoelétrico



Fonte: Guimarães (2018)

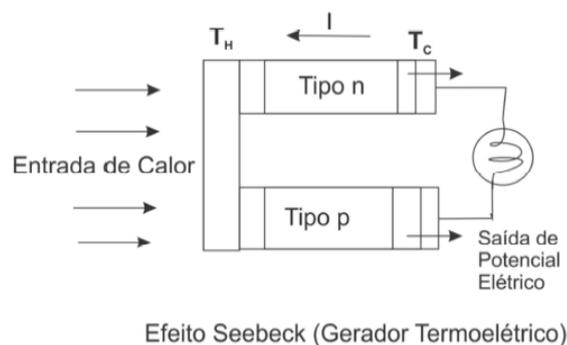
## 3.2 GERAÇÃO TERMOELÉTRICA

A geração de energia termoelétrica baseia-se no efeito Seebeck-Peltier, ou seja, uma geração através da diferença de potencial entre duas junções quando elas estão em diferentes temperaturas assim como, uma geração através de um gradiente de temperatura quando duas junções são alimentadas por uma tensão, respectivamente. Ao comparar a termoeletricidade com as usinas termoelétricas existentes, Junior (2014) observou que os materiais termoelétricos reduzem alguns passos nos processos, por exemplo, o aquecimento de água para geração de vapor.

### 3.2.1 Figura de Mérito $Z_T$

Um gerador termoelétrico é uma máquina térmica, logo, está sujeito às leis da termodinâmica. Ao se considerar o gerador termoelétrico como sendo ideal, onde não há nenhuma perda de calor existente, pode-se definir a eficiência como a taxa entre a potência elétrica gerada e o calor absorvido pela junção quente. Considera-se o tipo mais simples de gerador para derivar as equações que regem os parâmetros o qual consiste em um termopar de um estágio, formado por materiais semicondutores termoelétricos do tipo N (negativo) e do tipo P (positivo), como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Gerador termoelétrico composto por um termopar de um estágio



Fonte: Rowe (2006)

A eficiência do gerador é dada pela Equação 3.4:

$$\Phi = \frac{\text{Energia gerada}}{\text{Calor transferido pela junção quente}} \quad (3.4)$$

Assumindo que as condutividades elétricas e térmicas e os coeficientes Seebeck de **a** e **b** (na Figura 7) são constantes ao longo do termopar, e desprezando as resistências de contato entre as junções e comparando à soma de resistência do termopar, então a eficiência pode ser expressa pela Equação 3.5.

$$\Phi = \left( \frac{I^2 R}{\alpha_{ab} I T_h + \lambda' (T_h - T_c) - \frac{1}{2} I^2 R} \right) \quad (3.5)$$

Onde  $R$  é a resistência em série de **a** e **b** (da Figura 7),  $\lambda'$  é a condutividade térmica em paralelo de **a** e **b**,  $\alpha_{ab}$  é o coeficiente de Seebeck do termopar,  $I$  é a corrente elétrica gerada,  $T_h$  é a temperatura do lado quente e  $T_c$  é a temperatura do lado frio, ambas dadas em graus Celsius. Em materiais termoelétricos,  $R$ ,  $\lambda'$  e  $\alpha$  mudam com a temperatura, e tanto para refrigeração quanto para geração deve ser levada em conta. No entanto, a equação simplificada para a eficiência pode ser aplicada com um grau aceitável de precisão se forem adotados valores médios os parâmetros ao longo da faixa de operação do sistema (Rowe (2006) e Junior (2016)).

A eficiência é uma função da razão entre a resistência de carregamento pela soma das resistências do termopar, a eficiência máxima na geração é dada pela Equação 3.10.

$$\Phi_{max} = \eta_c \gamma \quad (3.6)$$

onde,

$$\eta_c = \frac{T_h - T_c}{T_h} \quad (3.7)$$

e,

$$\gamma = \frac{\sqrt[2]{1 - Z_c \bar{T}} - 1}{\sqrt[2]{1 - Z_c \bar{T}} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (3.8)$$

e,

$$\bar{T} = \frac{T_h + T_c}{2} \quad (3.9)$$

Simplificando tem-se:

$$\Phi_{max} = \frac{T_h - T_c}{\frac{3T_h}{2} + \frac{T_c}{2} + \frac{4}{Z_c}} \quad (3.10)$$

Onde  $Z_c$  é a figura de mérito do termopar.

A figura de mérito ( $Z_T$ ) pode ser definida como a medida da capacidade dos materiais termoelétricos na transformação de energia térmica em energia elétrica, para determinada temperatura, integrando o coeficiente de Seebeck ( $\alpha$ ), a resistividade elétrica ( $R$ ) e a condutividade

térmica ( $\lambda'$ ) (DUTRA; MELO, 2014). Um bom material termoelétrico possui uma boa figura de mérito. Sendo que a Equação 3.11 descreve essa relação, a unidade de medida é  $^{\circ}C^{-1}$ .

$$Z_T = \frac{\alpha_{ab}^2}{R\lambda'} \quad (3.11)$$

Se as geometrias de **a** e **b** forem projetadas para minimizar a absorção de calor, a figura de mérito  $Z_T$  é dado pela Equação 3.12.

$$Z_T = \frac{\alpha_{ab}^2}{\left[\left(\frac{\lambda_a}{\sigma_a}\right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{\lambda_b}{\sigma_b}\right)^{\frac{1}{2}}\right]} \quad (3.12)$$

As junções de termopares possuem materiais com constantes similares, logo, a equação que descreve a figura de mérito pode ser simplificada de acordo com a Equação 3.13, na qual o produto  $\alpha^2\sigma$  refere-se ao fator de potência elétrica.

$$Z_T = \frac{\alpha^2\sigma}{\lambda} \quad (3.13)$$

A figura de mérito foi apresentada pela primeira vez no estudo teórico conduzido por Edmund Altenkirch, entre 1909 e 1911, no qual mostrou que os parâmetros mais importantes na comparação entre vários materiais termoelétricos eram o coeficiente de Seebeck, a condutividade térmica e a condutividade elétrica.

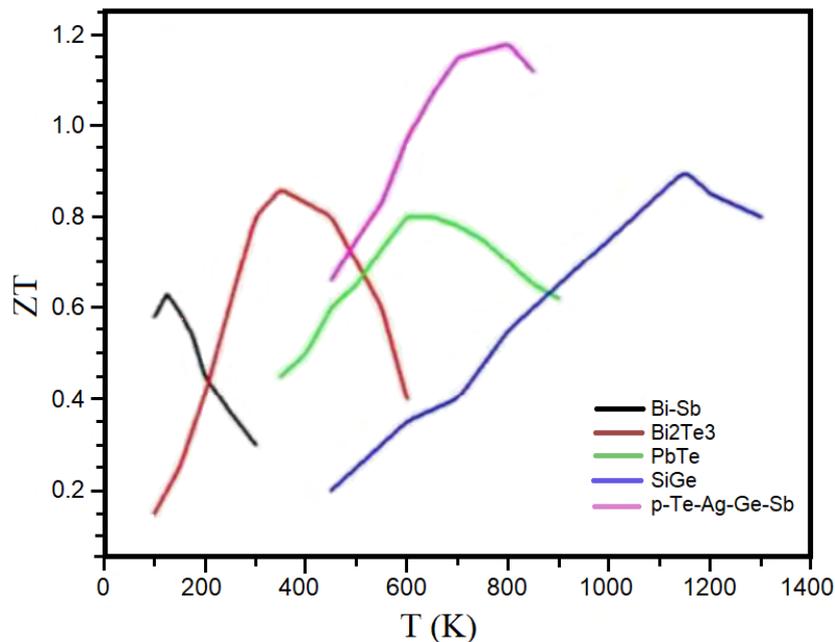
Todas as relações citadas foram derivadas a partir da consideração que os parâmetros termoelétricos que agem na figura de mérito  $Z_T$  são independentes da temperatura, mas na prática não é esse o caso. Assumindo um valor médio pode-se obter valores próximos do valor real, com uma margem de erro de cerca de 10% (ROWE, 2006).

Um material para ser bom do ponto de vista termoelétrico terá que possuir um elevado coeficiente de Seebeck, uma condutividade térmica baixa e resistividade elétrica baixa. É difícil encontrar apenas um material com a correlação dessas três variáveis. Normalmente, um material que possui uma boa condutividade elétrica (resistividade elétrica baixa) é também possui uma boa condutividade térmica. A Figura 12 mostra a relação da figura de mérito com a temperatura de algumas ligas.

Os metais geralmente possuem baixos coeficientes de Seebeck e condutividade térmica elevada, o que não é compensado pela sua baixa resistividade elétrica. Por outro lado, os materiais isolantes têm coeficientes de Seebeck elevados, mas isso não compensa a sua condutividade elétrica muito baixa.

Portanto, os semicondutores possuem o máximo da figura de mérito resultante, pois eles estão posicionados na região da concorrência dos parâmetros individuais. Este máximo apoia-se por coeficientes de Seebeck moderados e uma boa condutividade térmica, limitada por uma elevada condutividade elétrica.

Figura 12 – Figura de Mérito Vs temperatura de algumas ligas



Fonte: Fernandes (2012)

### 3.2.2 Materiais Termoelétricos

Os materiais podem ser classificados considerando a sua condutividade elétrica. Os materiais podem possuir alta condutividade elétrica, os metais, ou baixa condutividade elétrica, os materiais isolantes. Os materiais isolantes possuem uma condutividade muito baixa, sendo considerada zero em condições normais. Os materiais semicondutores estão em uma posição intermediária entre metais e isolantes.

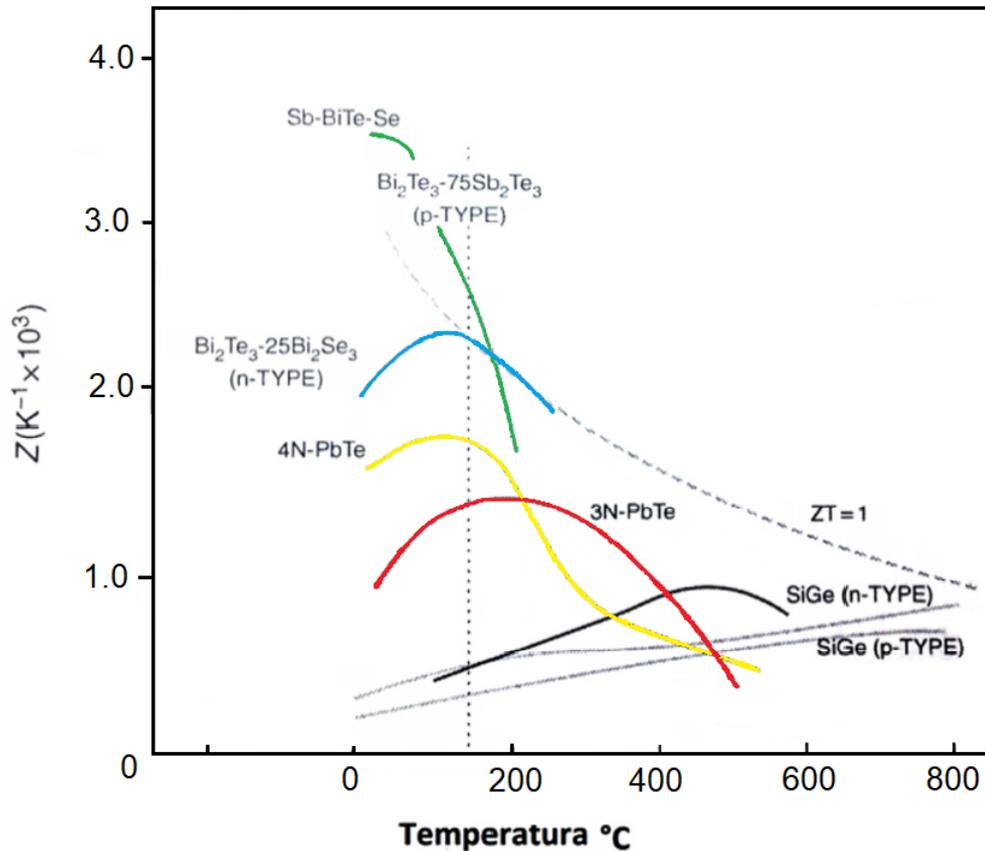
A condutividade elétrica é um reflexo da concentração de cargas livres (elétrons), e os três parâmetros que ocorrem na figura de mérito ( $Z_T$ ) são funções dessa concentração. A condutividade elétrica aumenta com o aumento do número de cargas livres, e o coeficiente de Seebeck diminui com o fator de potência maximizado (DUTRA; MELO, 2014).

A contribuição eletrônica para a condutividade térmica  $\lambda'$  corresponde a 1/3 do seu total em materiais termoelétricos, e aumenta com o aumento do número de cargas livres. Portanto, a figura de mérito  $Z_T$  é otimizada em concentrações de cargas livres correspondentes a materiais semicondutores, por isso esses materiais são os mais pesquisados para aplicações termoelétricas.

Em aplicações comerciais, os materiais termoelétricos podem ser divididos em três grupos de acordo com sua faixa de temperaturas de operação, como visto na Figura 13.

Um material termoelétrico opera com seu  $Z_T$  máximo em uma determinada temperatura. Logo, quando a operação ocorre em uma larga faixa de temperaturas, a maioria dos materiais termoelétricos operam abaixo de seu Coeficiente de Performance (COP). Portanto, o COP de um material termoelétrico pode ser aumentado através da segmentação.

Figura 13 – Materiais termoelétricos agrupados de acordo com a sua gama de temperaturas de operação



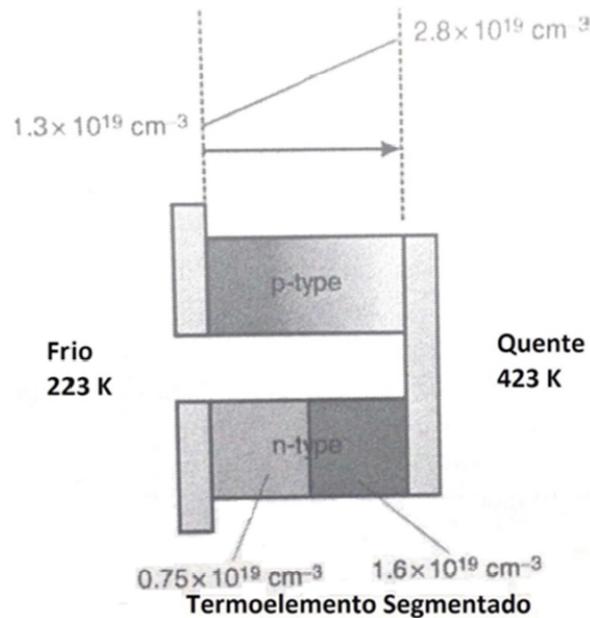
Fonte: Rowe (2006)

Em um gerador termoelétrico multi-segmentado, para aplicações de aproveitamento de gases de exaustão em automóveis as seções do lado frio dos elementos do tipo P (positivo) e N (negativo) são compostas de materiais baseados em Telureto de Bismuto. Enquanto que as seções do lado quente dos elementos do tipo P e N são compostas de materiais de alta performance, por exemplo, Arsenieto de Cobalto com Antimoneto de Zinco segmentado na perna do elemento tipo N, para operar na faixa de temperaturas intermediárias. Um exemplo de um gerador termoelétrico multi-segmentado é mostrado na Figura 14.

### 3.2.3 Módulos Termoelétricos

Geradores termoelétricos estão entre as tecnologias mais promissoras para a recuperação de calor. Um gerador termoelétrico permite transformar diretamente um diferencial de temperatura em energia elétrica. Estas células de conversão são compostas por um par de materiais termoelétricos, que quando tem suas diferentes superfícies expostas a temperaturas distintas é capaz de gerar uma diferença de potencial elétrico, e logo uma corrente elétrica (SAIDUR et al., 2012). O esquema de uma célula de conversão termoelétrica pode ser visto na Figura 15.

Figura 14 – Gerador termoelétrico multi-segmentado



Fonte: Rowe (2006)

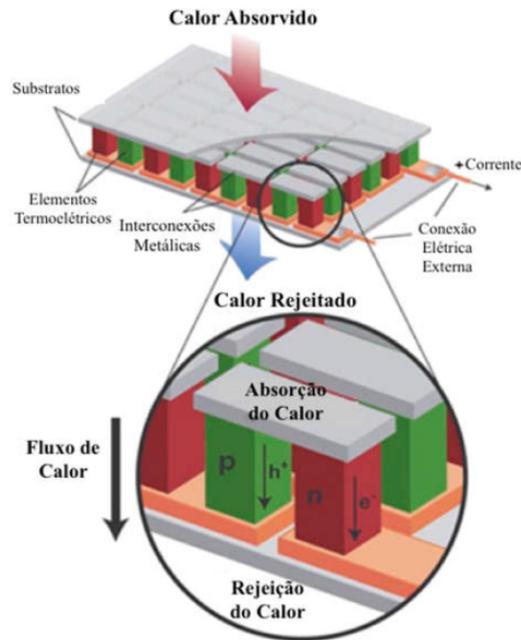
O módulo é o bloco base do sistema de conversão termoelétrica, e sua construção é muito similar tanto para as aplicações de refrigeração quanto para a geração de energia. Deve-se considerar uma geometria ideal para a construção de módulos. Para módulos de geração de energia, os termoelementos devem ser compridos e finos, enquanto que para a refrigeração devem ser curtos e grossos. Quanto ao tamanho, os módulos podem variar de  $1,5\text{mm}^2$  para um módulo com um único termopar até  $50\text{mm}^2$  para um módulo de multi-elementos.

Até um certo tempo, os módulos termoelétricos disponíveis comercialmente eram projetados para refrigeração (efeito Peltier). Mas nos últimos 10 anos, os módulos termoelétricos para geração termoelétrica (efeito Seebeck) ficaram mais disponíveis no mercado, com sua geometria e material selecionados para obter o maior rendimento nessa aplicação.

A capacidade de geração de um módulo termoelétrico é avaliada pela sua eficiência de conversão e potência por unidade de área. Módulos termoelétricos operam no modo Seebeck para converter calor em eletricidade. O potencial elétrico gerado por cada módulo depende do número de termopares presentes, da sua disposição, das propriedades térmicas e elétricas dos materiais utilizados e das camadas de contato, e da diferença de temperatura através do módulo.

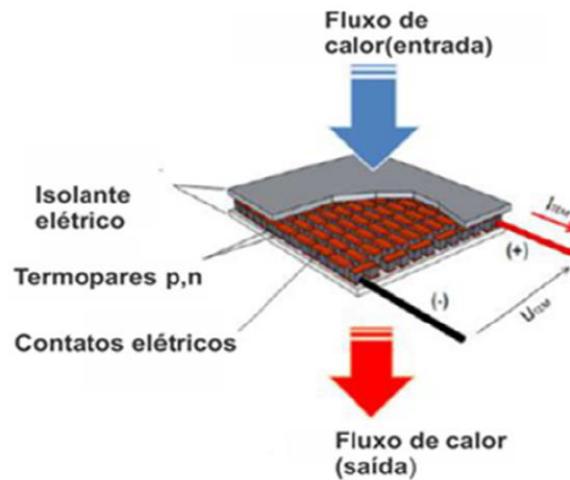
Os termopares simples possuem uma tensão de saída muito baixa, micro-volts por grau Celsius. Para aplicações práticas que necessitam de valores relativamente maiores de tensão, é necessário conectar um grande número de termopares eletricamente em série e termicamente em paralelo. Pode-se visualizar um módulo termoelétrico na Figura 16.

Figura 15 – Esquema básico de um dispositivo de conversão termoelétrica



Fonte: Adaptado de Saidur et al. (2012)

Figura 16 – Módulo termoelétrico



Fonte: Adaptado de Rowe (2006)

o rendimento térmico de uma célula termoelétrica está diretamente ligado a uma propriedade adimensional dos materiais chamada figura de mérito. A eficiência do módulo termoelétrico é dada pela Equação 3.14 abaixo:

$$\eta = 1 - \left( \frac{T_C}{T_H} \right) \left( \frac{mZT_1}{ZT_m + mZT_1 + (m+1)^2} \right) \quad (3.14)$$

Em que  $T_C$  é a temperatura do lado frio, dada em graus Celsius,  $T_H$  é a temperatura do lado quente, dada em graus Celsius,  $ZT_1$  é a figura de mérito do módulo para Temperatura 1,  $ZT_m$  é a figura de mérito para temperatura média e  $m = 1$ .

Os módulos termoelétricos possuem diversas vantagens em relação as outras tecnologias, e algumas são citadas a seguir:

- Não possuem partes móveis e, portanto, precisam de menos manutenção.
- Podem funcionar em ambientes que são muito severos, muito sensíveis ou muito pequeno para a refrigeração convencional.
- O tempo de vida destes dispositivos excedem 10.000 h em estado estacionário de operação.
- A direção do fluxo de calor em um sistema termoelétrico é totalmente reversível. Alterando a polaridade da fonte de alimentação DC faz com que o fluxo de calor seja bombeado na direção oposta, podendo então um refrigerador se tornar um aquecedor.

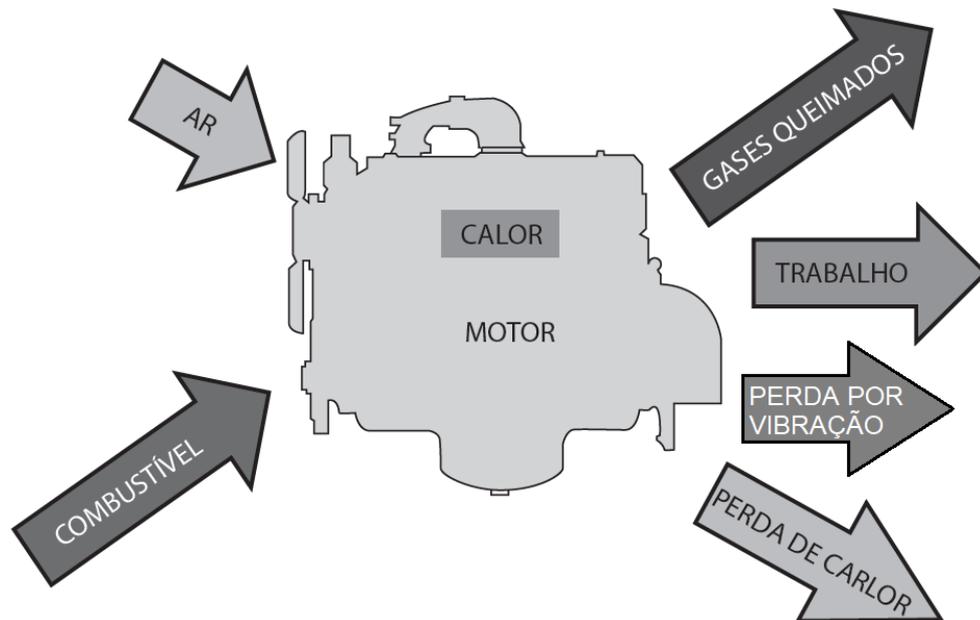
Devido as diversas vantagens, os dispositivos termoelétricos encontram aplicações extensas em várias áreas, como militares, aeroespaciais, instrumentos e produtos industriais ou comerciais. De acordo com os modos de funcionamento, essas aplicações podem ser classificadas em três categorias, que são refrigeradores (ou aquecedores), geradores de energia ou sensores de energia térmica.

### 3.3 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

O motor de combustão interna pode ser definido como uma máquina térmica que tem como objetivo a produção de trabalho mecânico através da transformação da energia química contida no combustível. Em motores de combustão interna a liberação de energia se dá pela queima ou oxidação do combustível dentro do motor (esquematizado na Figura 17) . Portanto, os fluidos de trabalho reais são considerados os gases de combustão e de exaustão. Diferentemente dos motores de combustão externa, onde a combustão se processa externamente ao módulo onde a energia é gerada e não ocorre mistura entre os fluidos de trabalho e os gases de combustão, nos motores de combustão interna a combustão se processa internamente ao módulo onde a energia é gerada e há a mistura entre os fluidos de trabalho e os gases de combustão. Devido a características como simplicidade, robustez e alta relação entre a potência fornecida/peso, o motor de combustão interna encontra ampla aplicação para fins de transporte e geração de energia (HEYWOOD, 1988).

Existem duas maneiras principais de classificar motores de combustão interna, a primeira é em função do ciclo termodinâmico que eles utilizam para gerar energia, a segunda é em função do tipo de movimento realizado. Apesar da denominação motor de combustão interna ser frequentemente utilizado para designar os motores a ciclo Otto e Diesel, ela se refere a vários ciclos como Otto, Diesel, Brayton, Lenoir, Atkinson e Miller e outros. Esses motores também

Figura 17 – Fluxos de massa e energia em um motor de combustão interna



Fonte: Adaptado de Brunetti (2013)

podem ser classificados segundo seu tipo de movimento, podendo ser rotativos ou alternativos. Entretanto, o presente trabalho irá focar apenas nos motores a ciclo Otto e Diesel, pois estes são os tipos de motores alternativos mais utilizados em automóveis. O presente trabalho irá utilizar um motor de combustão interna diesel com injeção de gás Brown, ou seja, um motor de combustão interna unido com as características do hidrogênio, usado para melhorar a eficiência da queima (MICHAELWICZ et al., 2017).

Os motores a ciclo Otto e os a ciclo Diesel possuem um funcionamento muito similar, contendo como principal diferença a ignição, ou seja, enquanto a mistura do ar-combustível é feita por uma fagulha no Otto, no Diesel a ignição é feita por compressão. Ambos os tipos de motores têm ainda uma subclassificação em relação ao número de cursos do pistão por ciclo, podendo ser de dois tempos (dois cursos do pistão por ciclo), quatro tempos (quatro cursos do pistão por ciclo) ou seis tempos (seis cursos do pistão por ciclo), este último foi desenvolvido como uma alternativa de melhorar o desempenho do de quatro tempos.

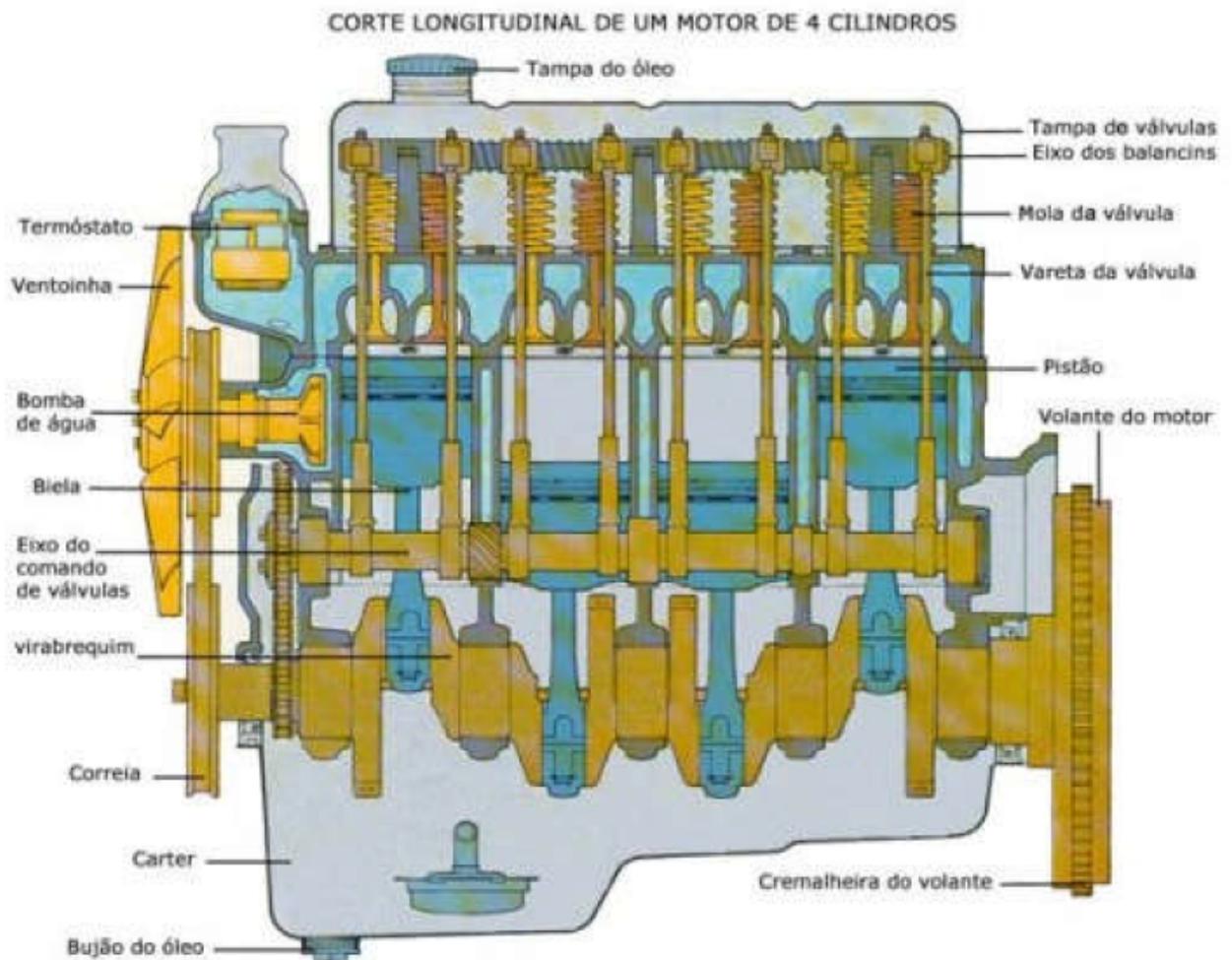
### 3.3.1 Motor Ciclo Otto

Tanto o motor do ciclo Otto quanto o a ciclo Diesel são motores alternativos, ou seja, a energia da combustão empurra um pistão ligado a um mecanismo de biela-manivela, que gira um virabrequim, essa estrutura pode ser visualizada na Figura 18. A rotação do virabrequim é transferida para as rodas através do sistema de transmissão. Em geral, os motores alternativos utilizados em automóveis funcionam baseado no ciclo de 4 tempos.

No ciclo Otto os quatro tempos de atuação do motor são definidos como: admissão,

compressão, explosão (ou expansão) e expulsão. Cada tempo de atuação, pode ser visualizado na Figura 19, é detalhado a seguir:

Figura 18 – Corte longitudinal de um motor a ciclo Otto de 4 tempos



Fonte: Brito (2017)

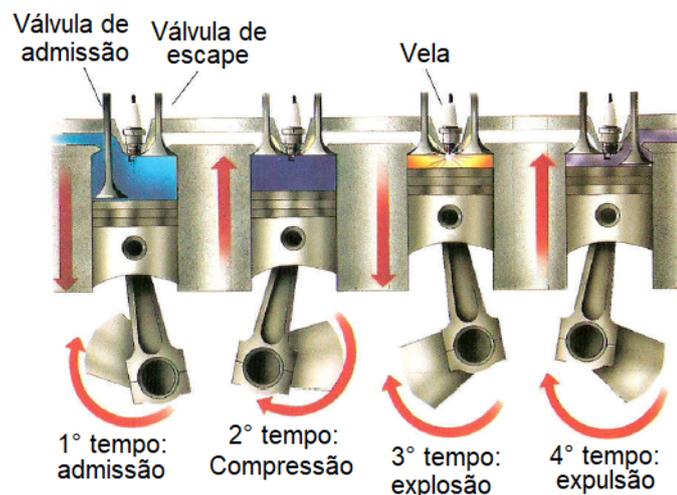
- **1º Tempo:** Admissão Nesta etapa o pistão se desloca para baixo até o ponto morto inferior (PMI), ou seja, até a posição mais baixa, e a válvula de admissão abre-se permitindo a entrada de uma nova mistura de ar e combustível.
- **2º Tempo:** Compressão Após a admissão do ar, ambas as válvulas são fechadas e o pistão sobe até a posição mais alta, ou seja, o ponto morto superior (PMS), realizando-se assim a compressão da mistura ar-combustível aumentando sua temperatura.
- **3º Tempo:** Expansão Nesta etapa ambas as válvulas permanecem fechadas. Então, a mistura ar-combustível comprimida é inflamada por uma faísca entregue pela vela, fazendo com que a mistura se expanda e empurre o pistão para baixo até o PMI. É nesta fase em

que o trabalho é realizado. Ocorre também a perda de uma parte da energia da combustão, sendo transferida para o bloco do motor e para o próprio pistão.

- **4º Tempo:** Expulsão Nesta etapa a válvula de escape se abre e o pistão sobe novamente expulsando os gases resultantes da combustão, os quais são direcionados ao sistema de exaustão para serem tratados e descartados ao ambiente.

Na termodinâmica, o ciclo Otto é considerado como uma sequência de quatro processos internamente reversíveis em série, são eles: uma compressão isentrópica (na etapa de compressão), uma troca de calor a volume constante (na etapa da combustão), uma expansão isentrópica (na etapa da expansão) e outra troca de calor a volume constante (representando a exaustão e a admissão) (MORAN et al., 2015).

Figura 19 – Quatro tempos de um motor a ciclo Otto



Fonte: Brito (2017)

### 3.3.2 Motor Ciclo Diesel

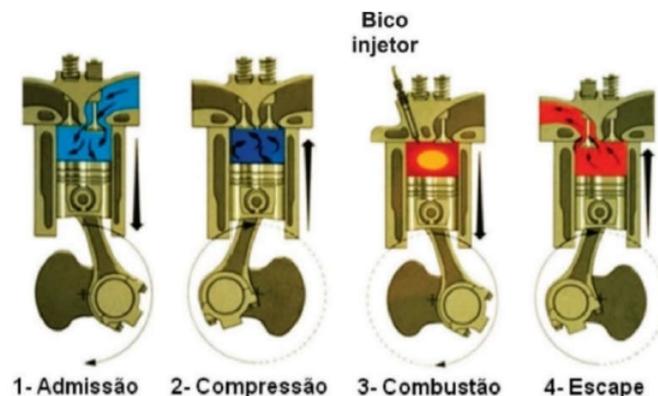
O motor a ciclo Diesel é classificado como um motor de ignição por compressão, é o tipo de motor mais utilizado em automóveis de passeio e contém também quatro tempos. Seu funcionamento é bem semelhante aos motores do ciclo Otto, contendo algumas diferenças.

Uma das diferenças entre os dois tipos de motores está na etapa de admissão, onde apenas o ar entra no cilindro e não uma mistura ar-combustível. Este ar vai ser então comprimido sozinho na etapa de compressão, portanto as taxas são muito maiores do que no ciclo Otto. A compressão é bem maior que nos motores a ciclo Otto, logo, o ar aquece até temperaturas maiores do que o ponto de autoignição do combustível. Neste ponto terá início a etapa de explosão, onde um bico injetor irá introduzir o combustível fazendo com que ocorra uma combustão espontânea.

Finalmente a combustão faz a mistura ar-combustível se expandir empurrando o pistão. As etapas descritas podem ser visualizadas na Figura 20.

Os motores a ciclo Diesel possuem uma maior eficiência em relação aos de ciclo Otto, pois possuem taxas de compressão maiores e ainda permitem combustíveis com temperaturas de ignição mais altas diferente dos combustíveis voláteis necessários no ciclo Otto (MORAN et al., 2015). Entretanto, os motores do ciclo Diesel são bem mais robustos pois precisam resistir a maiores esforços de compressão e expansão.

Figura 20 – Quatro tempos de um motor a ciclo Diesel



Fonte: Brito (2017)

Na termodinâmica, o ciclo Diesel idealizado é composto de: uma compressão isentrópica (na etapa de compressão), uma troca de calor a pressão constante (representando a injeção de combustível e em seguida a combustão), uma expansão isentrópica (na etapa da expansão) e uma troca de calor a volume constante (representando a exaustão e a admissão) (MORAN et al., 2015).

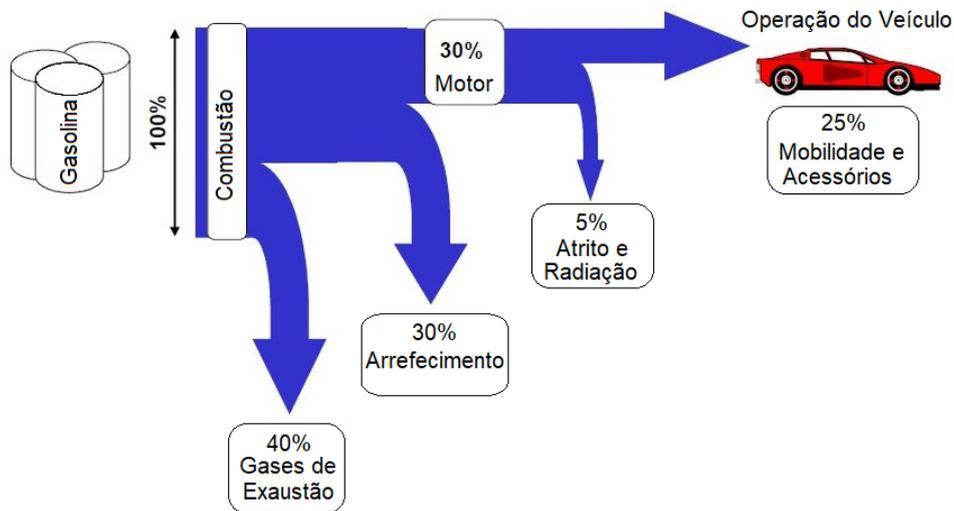
### 3.3.3 Perdas de Energia

Os motores de combustão interna são conhecidos por terem rendimento relativamente baixo comparado a outros tipos de sistemas de geração de energia. Apenas cerca de 25% da energia liberada pela combustão é realmente utilizada para fins de mobilidade e acionamento elétrico de acessórios dos automóveis em que é empregado. A maior parte das perdas deste tipo de motor se dá através do sistema de exaustão e do sistema de arrefecimento do motor - cerca de 40% e 30% respectivamente (YANG, 2005). Essas perdas fazem com que os motores de combustão interna (principalmente os a ciclo Otto) estejam entre os menos eficientes meios de geração de energia, logo é de suma importância que sejam desenvolvidas tecnologias que visem aumentar o rendimento térmico dos motores de combustão interna de automóveis.

Como pode ser visto no caminho energético típico da combustão da gasolina em veículos, mostrado na Figura 21, mais de dois terços da energia consumida pelo automóvel são descarre-

gados para o meio ambiente como calor residual. Com isto, pode-se perceber que há potencial para melhoria no desempenho de um motor de combustão interna, seja através da recuperação da energia em forma de calor e pressão dos gases de exaustão ou em forma de calor no fluido do sistema de arrefecimento. Hsiao et al. (2010) realizaram uma análise da viabilidade do uso de geradores termoelétricos em duas posições num automóvel, o tubo de escape e o radiador. Nesta análise, verifica-se que o módulo termoelétrico apresenta melhor desempenho no tubo de escape do que no radiador de um automóvel.

Figura 21 – Caminho energético típico da gasolina em um veículo com motor de combustão interna



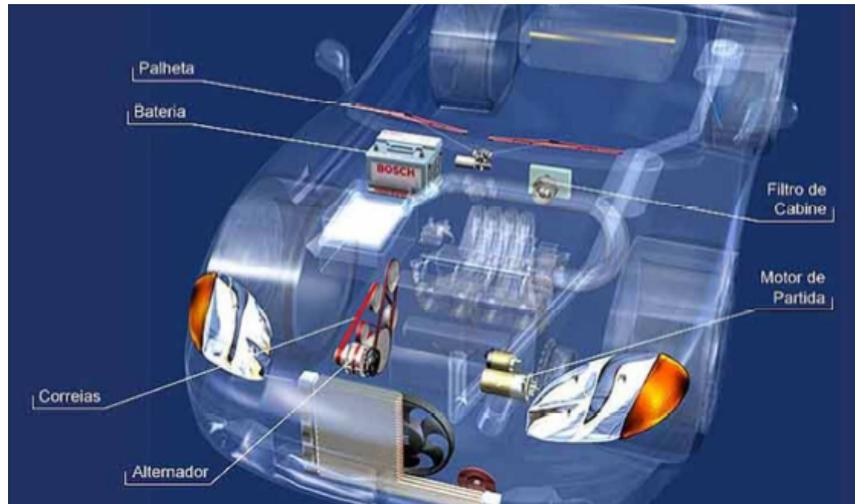
Fonte: Adaptado de Yang (2005)

### 3.4 SISTEMA ELÉTRICO AUTOMOTIVO

O sistema elétrico de um automóvel está dividido em circuitos, no qual cada circuito possui sua função e comando, alguns exemplos são: o circuito de ignição, o circuito de carga da bateria, circuito de arranque, entre outros.

Existem basicamente duas fontes de energia elétrica para esses circuitos de um automóvel, o alternador, que transforma parte da energia gerada no motor em energia elétrica, e a bateria, que armazena essa energia e é utilizada como fonte para alguns sistemas do automóvel quando o motor encontra-se desligado, assim como é utilizada para dar a partida no motor. A bateria também age como filtro para as variações de carga que podem acontecer. A Figura 22 mostra uma representação simples do sistema elétrico de um veículo comercial.

Figura 22 – Esquema elétrico de um veículo



Fonte: Junior (2016)

### 3.4.1 Bateria

Nos automóveis é mais comum encontrar baterias compostas de acumuladores de chumbo-ácido, devido ao custo benefício, e possuem um ciclo de vida de 3 a 5 anos. Esse tipo de bateria é capaz de transformar, em uma reação quase completamente reversível, energia química em energia elétrica. Na aplicação automotiva, são ligadas seis baterias de 2,1 Volts em série formando uma de 12 Volts.

Comercialmente, os principais pontos de interesse nas baterias são: a sua tensão nominal, que é a soma das voltagens produzidas em todas as células da bateria, a capacidade, que é a quantidade de corrente que a bateria fornece por hora e a corrente de partida, que é a corrente máxima que a bateria consegue fornecer sem ocorrer uma queda de tensão (JUNIOR, 2016).

### 3.4.2 Alternador

O alternador é uma máquina que transforma energia mecânica em energia elétrica. O alternador é ligado ao motor por uma correia e é alimentado por parte da potência do mesmo. Esse sistema é composto de: estator, rotor, placa retificadora, regulador de tensão e rolamentos. Os alternadores mais comuns comercialmente são de 85 A e 12,6 V, gerando aproximadamente 1000W (JUNIOR, 2016).

### 3.4.3 Motor de Partida

O motor de partida ou motor de arranque é um motor elétrico que é alimentado pela bateria do automóvel, e tem a função de acionar o motor de combustão interna, até que a combustão em si seja capaz de mover o motor. Ele é acionado apenas na partida, e permanece

desligado enquanto o MCI estiver funcionando (JUNIOR, 2016).

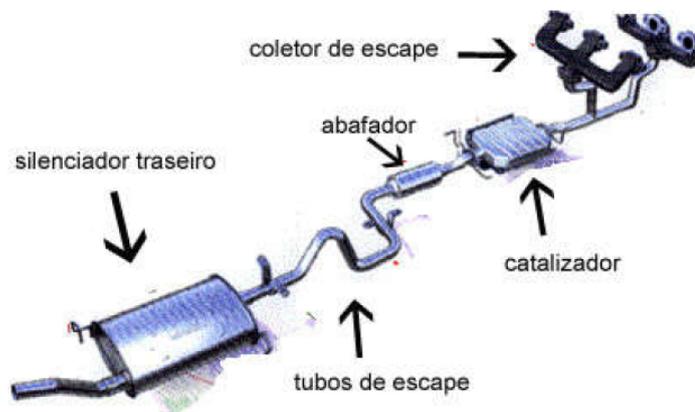
### 3.4.4 Retificador de Corrente

O retificador de corrente é um dispositivo que possui um conjunto de retificador composto de um banco de diodos, que servem para retificar a corrente gerada no alternador. Como o alternador gera uma corrente alternada, a qual não serve para carregar a bateria do veículo, é necessário transformar a corrente em alternada em contínua.

## 3.5 SISTEMA DE ESCAPAMENTO AUTOMOTIVO

O sistema de escapamento automotivo (mostrado na Figura 23) é formado por tubos e abafadores que têm o objetivo de conduzir os gases provenientes da queima do combustível para fora do motor. É um sistema formado por quatro partes: o conjunto dianteiro, conversor catalítico ou catalisador, conjunto intermediário e conjunto traseiro. As dimensões e especificações de cada escapamento são definidas pela montadora levando em consideração o projeto do carro que irá ser instalado.

Figura 23 – Esquema de um sistema de escape automotivo



Fonte: Brito (2017)

Os tubos do sistema de escapamento são projetados para levar os gases até um local que não afete em nada os usuários e busca reduzir o ruído da combustão e expulsão dos gases, utilizando silenciadores para uma redução eficiente dos ruídos.

Segundo Wang et al. (2011) as temperaturas das fases de exaustão de motores a ciclo Otto podem variar de cerca de 500 até 900 °C, sendo a faixa mais comum entre 600 e 700 °C. Já nos veículos que utilizam motores a Diesel, as temperaturas costumam ir de 500 a 650 °C. Após análises das características de um motor de combustão por faísca de 4 cilindros, encontrou-se

que o calor desperdiçado nos gases pode variar de 4,6 até 120 kW dependendo das condições de operação do veículo, enquanto que no fluido de arrefecimento do motor estes valores podem ser de 9 a 48 kW. As temperaturas máximas atingidas foram de 900 °C nos gases e 100 °C na água para arrefecimento.

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos com detalhes os materiais utilizados para a montagem do protótipo e o sistema montado para a obtenção dos dados a serem analisados.

Neste trabalho foi realizada uma avaliação na quantidade de módulos termoelétricos que seriam necessários para gerar 14 Volts, que representa a tensão necessária para ser utilizada por dispositivos elétricos automotivos. Também foi avaliado os ganhos que esse sistema de recuperação de calor pode proporcionar em um motor de combustão interna.

A metodologia do presente trabalho pode ser dividida nas seguintes etapas e estratégias de ação descritas (esquematizadas na Figura 24):

Figura 24 – Fluxograma da metodologia



Fonte: A Autora (2019)

1. Pesquisa bibliográfica.
2. Definição da geometria da unidade.
3. Definição dos materiais a serem utilizados.
4. Desenvolvimento do protótipo.
5. Coleta de dados.
6. Testes de bancada.
7. Análise dos resultados obtidos e estudo de casos com aplicação automotiva.

#### 4.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Em uma primeira análise, foi realizada uma revisão bibliográfica a fim de levantar informações com relação aos fundamentos dos motores de combustão interna e o uso de módulos termoelétricos para a geração de energia. Os trabalhos estudados são relativos à utilização de módulos termoelétricos em geral, projetos de engenharia para a construção de geradores termoelétricos voltados para a aplicação veicular. Também se estudou projetos relativos ao funcionamento de motores de combustão interna utilizados em automóveis, com foco nos produtos da sua combustão e sua parte elétrica.

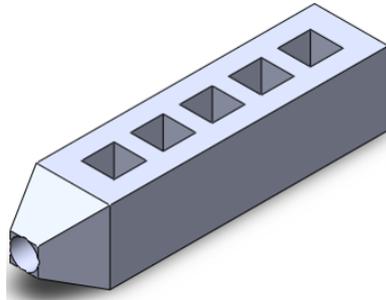
O foco dessa etapa foi dado no sentido de se avaliar o funcionamento prático das células termoelétricas. As atividades foram focadas na busca por trabalhos científicos recentes que abordem a temática do uso do módulo de Peltier na função de gerador termoelétrico acoplados a motores de combustão interna. Com a revisão bibliográfica pronta, foi possível realizar uma proposta conceitual de um gerador para a aplicação desejada.

#### 4.2 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA

A princípio a definição da geometria foi baseada no modelo descrito por Brito e Araújo (2017), esse modelo foi utilizado para determinar uma configuração ótima a ser utilizada como protótipo para recuperação de energia a partir do calor residual dos gases de exaustão em um motor de combustão interna. O modelo descrito por Brito e Araújo (2017) foi validado por meio de dados da literatura. Para a realização das simulações termodinâmicas utilizou-se o software *Wolfram Mathematica*, cuja licença foi adquirida pela UFPE para uso por seus alunos, professores e funcionários (DEMAT - UFPE, 2018).

Na Figura 25 pode-se ver a geometria que foi escolhida com base no modelo matemático. Escolheu-se uma geometria retangular com um adaptador circular em um dos lados, esse adaptador é necessário para o acoplamento do protótipo ao sistema de escape dos gases. A base retangular é a melhor geometria para acoplar as células de Peltier que são quadradas, e essa geometria permite utilizar vários desses módulos em mais de um de seus lados.

Figura 25 – Modelo do protótipo



Fonte: A Autora (2019)

### 4.3 DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais para a fabricação do gerador termoelétrico foram escolhidos com base na disponibilidade no mercado e materiais já disponíveis no laboratório, também foi pensado no custo mínimo. Os seguintes materiais foram utilizados na montagem do protótipo e nos testes:

- Dez módulos de Peltier modelo TEC1-12706.
- Vinte dissipadores de calor.
- Cola pasta adesiva térmica para dissipar calor.
- Parafusos para fixação dos dissipadores.
- Duas placas de alumínio.
- Soprador térmico.
- Ferramentas em geral (esquadro, serras, instrumentos de medição).
- Manta térmica para isolamento térmico.
- Protoboard.
- LEDs.
- Multímetro digital ICEL MD6110.
- Termopar.

#### 4.3.1 Especificação dos Módulos

Atualmente existem disponíveis no mercado internacional módulos termoelétricos produzidos especificamente para a geração de energia. Os módulos deverão ter uma potência capaz de auxiliar a parte elétrica de um veículo. Analisando as características dos módulos disponíveis

no mercado, na escolha dos módulos termoelétricos foi levado em consideração que o mesmo suporte altas temperaturas, e foi analisado a potência máxima de saída dos mesmos. O módulo encontrado com o melhor custo benefício e maior disponibilidade no mercado nacional foi o módulo de Peltier modelo TEC1 – 12706. As especificações dos módulos adquiridos são mostradas na Tabela 2.

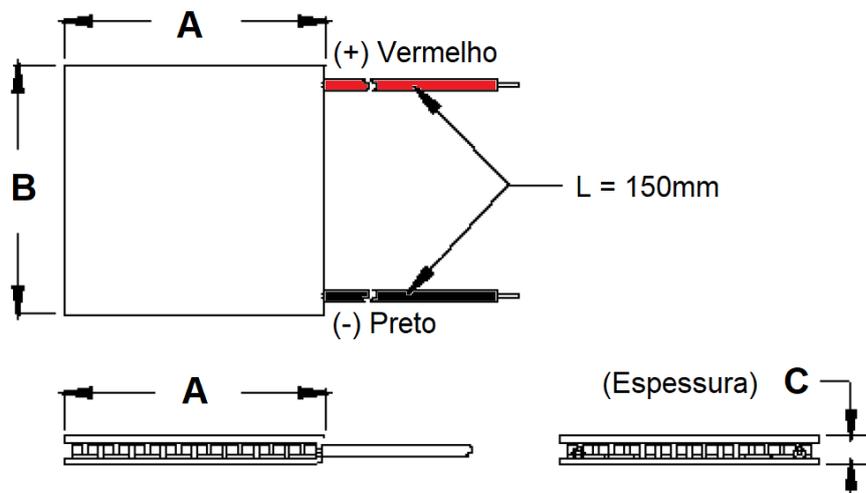
Tabela 2 – Especificações do Módulo Termoelétrico TEC1-12706

Descrição	Valor
Temperatura máxima do lado quente (°C)	138
$\Delta T$ máximo (°C)	68
Voltagem (V)	0 à 15,4
Corrente de saída (A)	0 à 6,4
Potência de saída (W)	63
Resistência interna ( $\Omega$ )	2,41
Peso (g)	27
Dimensões (WxDxH) (mm)	40 x 40 x 3,9

Fonte: Datasheet Trading (2016)

A célula de Peltier, modelo TEC1 – 12706, é composta por uma parte cerâmica e o material condutor interno. De acordo com o seu Datasheet, o material cerâmico é a Alumina ( $Al_2O_3$ ) e o material da Solda é uma liga de Estanho e Bismuto (BiSn). As dimensões desse módulo podem ser vistas na Figura 26. Onde A e B representam a largura e o comprimento, e são iguais a 40mm, e C representa a espessura, e é igual a 3.9mm (TRADING, 2016).

Figura 26 – Dimensões do Módulo Termoelétrico



Fonte: Datasheet Trading (2016)

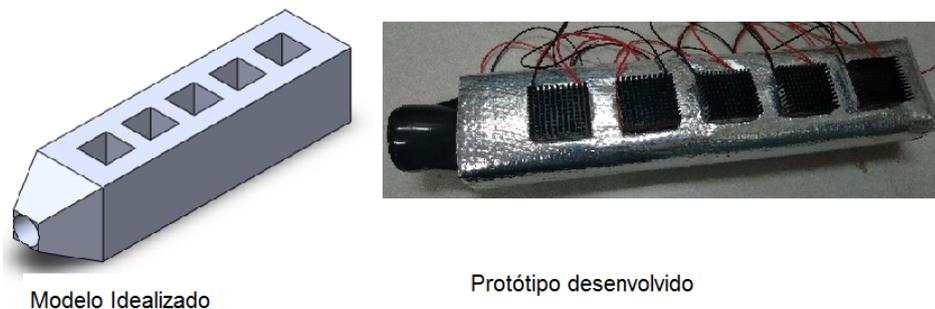
### 4.3.2 Fonte de Calor

Como o intuito de aplicação desse gerador é ser implantado em um escapamento automotivo, para replicar os gases de exaustão foi utilizado um soprador térmico montado diretamente no duto do gerador. Para simular a dissipação do calor do lado externo do escapamento utilizou-se um ventilador, mantendo-se a temperatura ambiente controlada por meio de um aparelho de ar condicionado tipo split. A escolha de usar o resfriamento maior ocorreu pois têm-se o intuito de melhorar o sistema de refrigeração externa para gerar a maior diferença de temperatura possível nos módulos termoeletricos, obtendo assim a maior eficiência possível dos mesmos.

### 4.4 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Nesta etapa montou-se um protótipo simplificado a fim de validar os resultados encontrados na simulação numérica. O modelo idealizado possui um adaptador circular na extremidade para poder realizar os testes e posteriormente vir a ser implementado no motor. Este modelo pode ser visualizado no lado esquerdo da Figura 27. No protótipo desenvolvido, visualizado do lado direito da Figura 27, utilizou-se um adaptador de plástico na entrada do protótipo que serve para acoplar o soprador térmico à tubulação.

Figura 27 – Protótipo de gerador termoeletrico



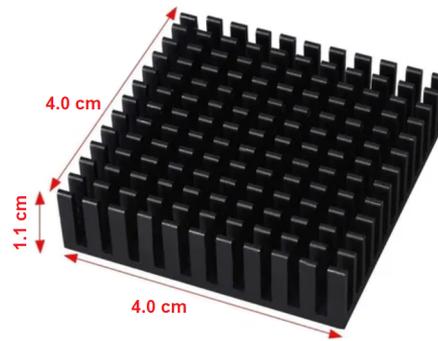
Fonte: A Autora (2019)

Para aumentar a taxa de transferência de calor entre as superfícies pode-se aumentar o coeficiente convectivo ( $h$ ) através da elevação da velocidade do fluido e/ou temperatura do fluido frio pode ser reduzida. A outra opção é aumentar a área da superfície através da qual ocorre a convecção (INCROPERA et al., 2008). Isso é efetuado ao se empregar aletas na superfície dos módulos termoeletricos. Segundo Incropera et al. (2008) o material da aleta deve ter condutividade térmica elevada para minimizar as variações de temperatura entre sua base e a extremidade.

Para a aplicação no projeto selecionou-se aletas de alumínio disponíveis no mercado, também conhecidas como dissipadores de calor. Ao escolher as aletas levou-se em consideração

uma que tivesse a geometria compatível com os módulos utilizados, e que possuísse baixa resistência térmica para aumentar o fluxo de calor através do sistema. As dimensões das aletas escolhidas podem ser visualizadas na Figura 28.

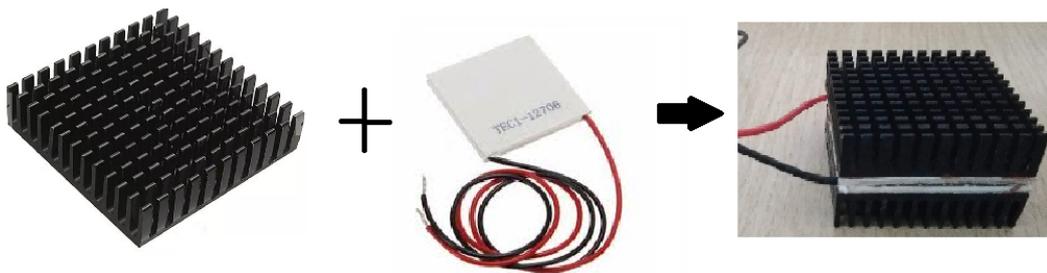
Figura 28 – Dimensões dos Dissipadores de Calor



Fonte: A Autora (2019)

As células de Peltier e os dissipadores de calor foram colados utilizando cola de silicone de alta temperatura e pasta térmica. A montagem das células de Peltier com os dissipadores de calor podem ser visualizados na Figura 29.

Figura 29 – Junção das células de Peltier com os dissipadores de calor



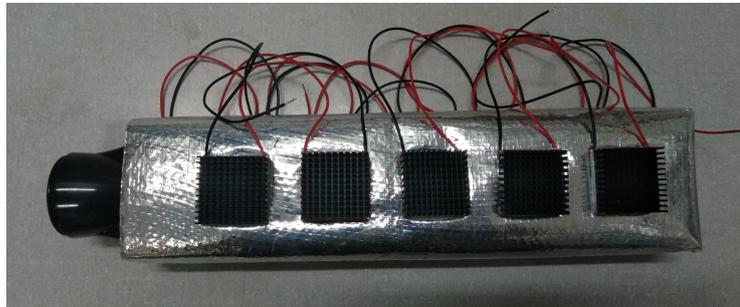
Fonte: A Autora (2019)

Após o acoplamento de todos os módulos termoelétricos e dissipadores, esperou-se o tempo necessário para a cola térmica secar completamente, encaixou-se as células e os dissipadores nos furos da base e adiciona-se a pasta epóxi para fixar os módulos, evitando a saída do gases quentes que irá passar na parte interna do tubo, de acordo com a Figura 30.

Para a construção do gerador utilizou-se um tudo de seção retangular e em sua ponta utilizou-se um adaptador para acoplar o soprador térmico à tubulação. Para a fabricação da base foram usadas chapas de alumínio de 1mm de espessura que foram cortadas, dobradas e furadas para ficarem de acordo com o modelo idealizado. As chapas de alumínio utilizadas foram

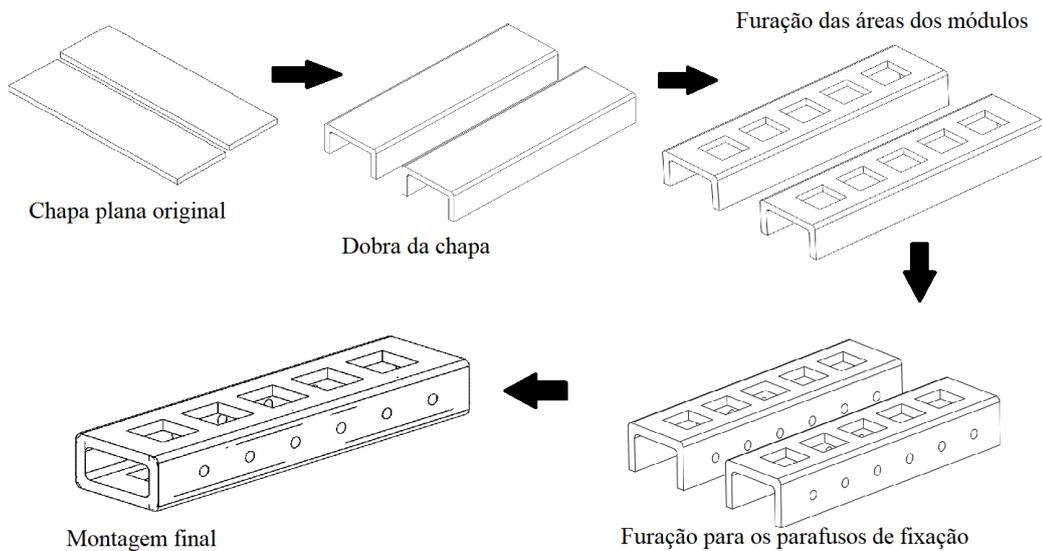
obtidas de sucatas disponibilizadas pelo laboratório. A fabricação da base seguiu de acordo com o fluxograma de fabricação da Figura 31.

Figura 30 – Acoplamento das células com os dissipadores de calor na base do protótipo



Fonte: A Autora (2019)

Figura 31 – Fluxograma de fabricação da base protótipo



Fonte: A Autora (2019)

Utilizou-se uma micro retífica para cortar os 5 furos quadrados, do tamanho das células de Peltier, em cada uma das laterais maiores das chapas de alumínio. Após os cortes utilizou-se uma lima para retirar qualquer superfície cortante residual. Em seguida, a junção das placas de alumínio foi feita utilizando-se parafusos com porcas, como pode ser visualizado na Figura 32.

Para aumentar a diferença de temperatura entre a parte interna e externa, as junções são isoladas com pasta térmica e após sua secagem completa, isolou-se a base do protótipo com a manta térmica, como pode ser visualizado na Figura 33.

Figura 32 – Base do protótipo



Fonte: A Autora (2019)

Figura 33 – Base do protótipo isolado com a manta térmica



Fonte: A Autora (2019)

#### 4.5 COLETA DE DADOS

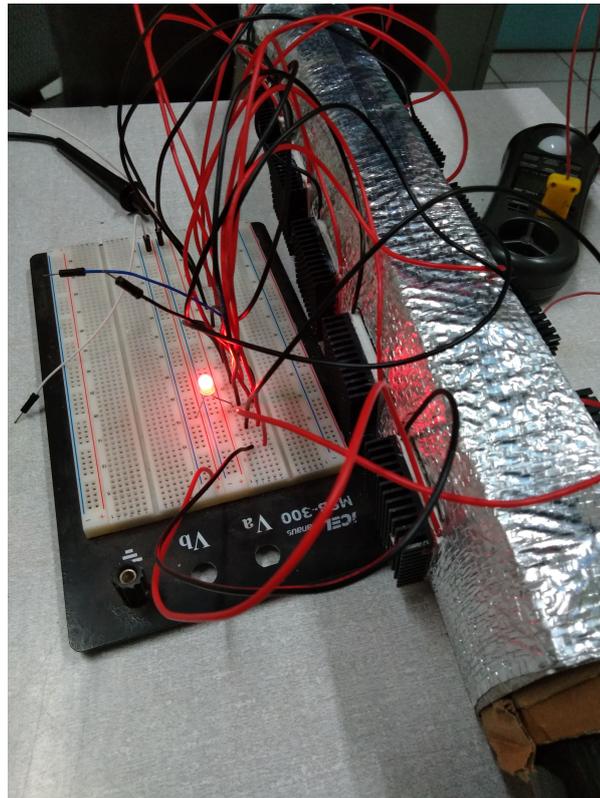
Para a medição de voltagem e amperagem utilizou-se um multímetro disponibilizado pelo professor orientador, e para a medição da temperatura interna foi utilizado termopares e para a medição da temperatura externa foi utilizado um termômetro digital infravermelho. Os dados foram contabilizados manualmente e apresentados no capítulo seguinte. Para a medição da corrente do circuito, utilizou-se o multímetro em série. Esse sistema foi montado em uma protoboard para facilitar a medição e também adicionar LEDs para os testes.

#### 4.6 TESTE DE BANCADA

Após o desenvolvimento do protótipo, realizou-se todas as conexões elétricas em uma protoboard e testes individuais em cada componente para garantir o seu bom funcionamento.

O protótipo desenvolvido foi testado usando um soprador térmico para simular a vazão dos gases de exaustão de um motor de combustão interna, como pode ser visualizado na Figura 34. Como dado de vazão do fluido quente, considerou-se adotar a vazão indicada pelo fabricante do equipamento.

Figura 34 – Teste de bancada do protótipo utilizando um soprador térmico



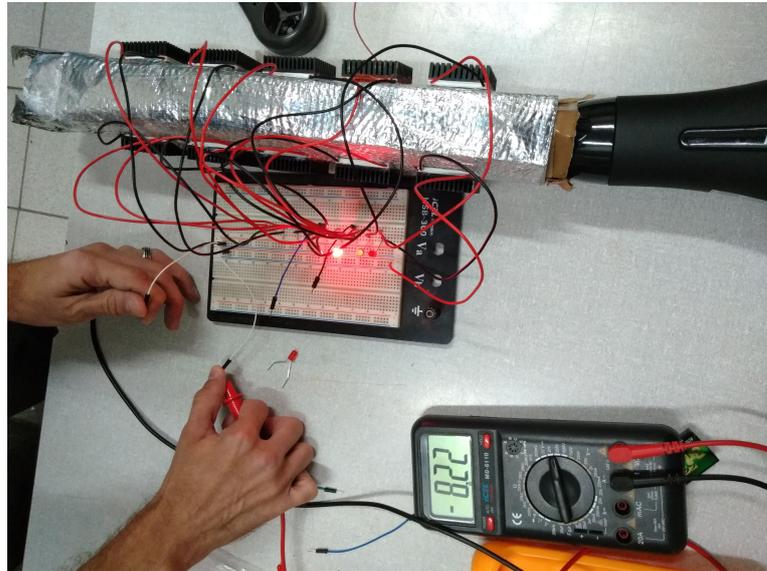
Fonte: A Autora (2019)

Para a medição dos dados aguardou-se o período transiente referente ao início de operação do sistema até o momento em que a temperatura interna e a voltagem gerada estabilizam. Nos testes realizados coletaram-se dados como as temperaturas interna e externa, a tensão e a corrente elétrica gerada pelas células de Peltier, a fim de validar o modelo matemático desenvolvido por Brito e Araújo (2017).

Nesta etapa as medições da tensão e da corrente foram feitas utilizando-se três temperaturas diferentes. Para cada temperatura foram realizadas cinco medições, divididas entre duas condições de operação, usando 10 células de Peltier e usando 5 células de Peltier, respectivamente. Na Figura 35 pode ser visualizado como as medições dos dados foram realizadas.

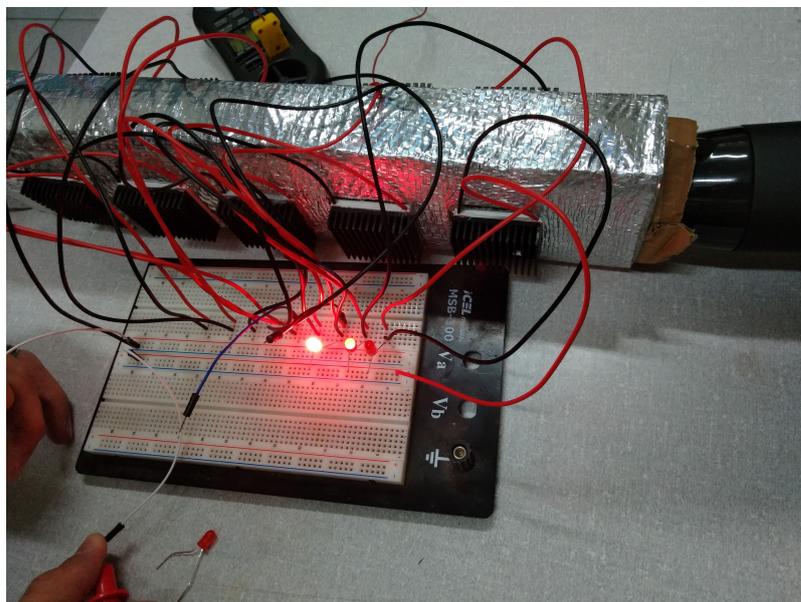
Para fazer a ligação em série das células de Peltier foi utilizado uma protoboard e também foram utilizados alguns LEDs para ver se a corrente gerada era suficiente para acendê-los, de acordo com a Figura 36.

Figura 35 – Realização das medições dos dados



Fonte: A Autora (2019)

Figura 36 – Ligação realizada nos módulos termoeétricos.



Fonte: A Autora (2019)

#### 4.7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Ao final, os resultados experimentais foram comparados com os dados obtidos da simulação numérica, realizada por Brito (2017), permitindo validar o modelo de simulação termodinâmica que poderá ser utilizado para desenvolver dispositivos semelhantes para recuperação de calor aplicada aos mais variados processos. Também realizou-se uma extrapolação para saber

a quantidade de células de Peltier que seriam necessárias para gerar 14 Volts para avaliação de estudo de caso aplicado à área automotiva para a configuração escolhida.

## 5 RESULTADOS

Os dados foram coletados em três níveis de temperaturas diferentes,  $100 < T_1 < 110^\circ\text{C}$ ,  $60 < T_2 < 70^\circ\text{C}$  e  $30 < T_3 < 40^\circ\text{C}$ . Foram tomadas 5 medições em cada uma das faixas de temperatura, obtendo-se a temperatura de entrada, a temperatura ambiente, a tensão gerada e a corrente gerada. Com os dados coletados, calculou-se a diferença de temperatura na entrada e potência gerada pelo sistema. Para cada nível de temperatura as células de Peltier foram ligadas eletricamente em série em dois conjuntos, com cinco e dez módulos respectivamente, e termicamente em paralelo. Os valores médios medidos para cada faixa de temperatura pode ser observado nas Tabelas 3 e 4.

Os dados completos dos testes de bancada com suas respectivas incertezas de medição, utilizando o protótipo desenvolvido, podem ser visualizados na Tabela 8, no Apêndice 6. Lembrando que, para a coleta dos dados aguardou-se o período em que a temperatura e a tensão gerada se estabilizaram.

O sistema de aquisição de dados forneceu 15 pontos para cada um dos dois conjuntos de células determinados, com 5 e 10 células respectivamente. A potência foi calculada conforme a Equação 5.1.

$$P = I * U \quad (5.1)$$

Onde  $P$  é a potência, dada em Watts,  $I$  é a corrente elétrica, dada em Ampère, e  $U$  é a tensão gerada, dada em Volts.

Tabela 3 – Média dos dados obtidos para a primeira configuração com 5 células de Peltier

Nível	Nº de Células	$T_i$ ( $^\circ\text{C}$ ) ( $\pm 1, 0\%$ )	$T_{ext}$ ( $^\circ\text{C}$ ) ( $\pm 1, 5$ )	$\Delta T$ ( $\pm 1, 5$ )	Tensão (V) ( $\pm 0, 5\%$ )	Corrente ( $\mu\text{A}$ ) ( $\pm 1, 2\%$ )	Potência ( $m\text{W}$ ) ( $\pm 10, 24\%$ )
T1	5	105,32	24,40	80,92	5,27	421,60	2,22
T2	5	68,48	24,28	44,20	2,86	154,88	0,44
T3	5	33,12	23,64	9,48	0,60	-	-

Fonte: A Autora (2020)

Os valores de corrente da faixa T3 na Tabela 3 não puderam ser medidos pois ficariam abaixo do limite de sensibilidade do instrumento de medição utilizado (multímetro digital ICEL MD6110).

Mais uma vez, os valores de corrente da faixa T3 na Tabela 4 não puderam ser medidos pois ficariam abaixo do limite de sensibilidade do instrumento de medição utilizado (multímetro digital ICEL MD6110).

Tabela 4 – Média dos dados obtidos para a primeira configuração com 5 células de Peltier

Nível	Nº de Células	$T_i$ (°C) (±1,0%)	$T_{ext}$ (°C) (±1,5)	$\Delta T$ (±1,5)	Tensão (V) (±0,5%)	Corrente ( $\mu A$ ) (±1,2%)	Potência (mW) (±10,24%)
T1	10	105,82	24,82	81,10	9,31	746,80	6,95
T2	10	69,08	24,40	44,68	5,05	327,94	1,66
T3	10	33,96	24,50	9,46	1,07	-	

Fonte: A Autora (2020)

### 5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para os dados coletados, foram realizadas duas análises. Na primeira análise, seleciona-se os dados pelos níveis de temperaturas, enquanto na segunda agrupa-se os dados de acordo com a quantidade de células de Peltier. A primeira análise é realizada para determinar a quantidade de módulos é necessária para atingir os 14V necessários para o uso de dispositivos eletrônicos no automóvel na faixa de temperatura utilizada nos testes. A segunda análise é realizada para saber quanto de tensão, corrente e potência o sistema montado teria ao ser acoplado a um motor de combustão interna, onde as temperaturas são maiores.

Tabela 5 – Tabela Resultados da simulação da unidade

Face do Sistema	Lado Frio	Lado Quente
Temperatura de Entrada do Fluido (°C)	80,0	921,6
Temperatura de Saída do Fluido (°C)	103,1	559,8
Temperatura Média do Fluido (°C)	91,56	740,7
Temperatura na Superfície do Duto (°C)	113,0	596,1
Fluxo de Calor Q (kW)	37,54	39,8
Potência Gerada (kW)	2,267	2,267
Tensão Elétrica (V)	101,2	101,2
Corrente Elétrica (A)	44,8	44,8
Eficiência Térmica	5,69%	5,69%

Fonte: Adaptado de Brito (2017)

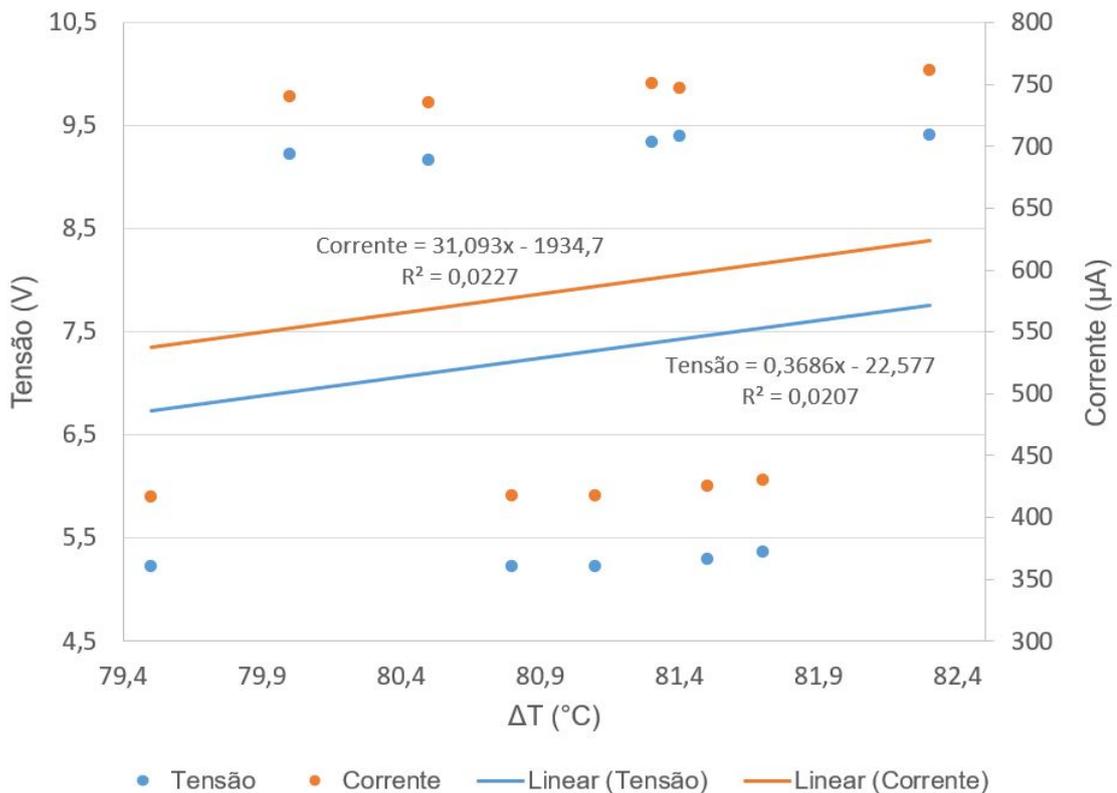
Para a segunda análise, comparou-se os resultados obtidos do experimento com os resultados obtidos através do modelo termodinâmico descrito por Brito e Araújo (2017). Os dados coletados através do modelo podem ser visualizados na Tabela 5.

Segundo Brito (2017) a relação entre a temperatura e as principais variáveis de saída do sistema é quase linear, logo, para otimizar os conjuntos de dados, traçou-se retas de otimização.

### 5.1.1 Primeira Análise

Analisando os dados visualizados na Tabela 8, no Apêndice 6, para o primeiro nível de temperatura  $T_1$ , obteve-se a relação entre a variação de temperatura, a tensão e a corrente. Estas relações podem ser visualizadas na Figura 37.

Figura 37 – Gráfico Tensão e corrente X  $\Delta T$  para o primeiro nível de Temperatura

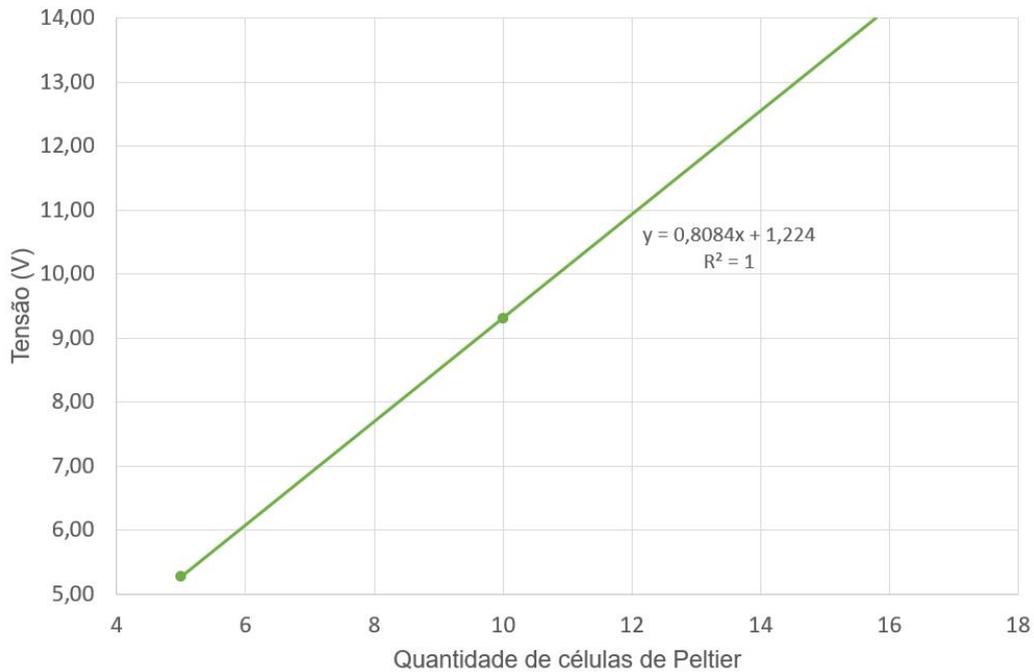


Fonte: A Autora (2020)

No gráfico da Figura 37 observa-se os valores pontuais obtidos nos testes de bancada e analisando os conjuntos de 5 (conjunto de pontos inferior na Figura 37) e 10 (conjunto de pontos superior na Figura 37) células de Peltier separadamente pode-se observar que eles possuem uma linearidade conforme Brito (2017) afirmou.

A partir dos dados coletados para a temperatura mais elevada (primeiro nível de temperatura), traçou-se uma reta a partir da média das tensões obtidas para o conjunto de 5 e 10 células de Peltier. Para esta reta fez-se uma extrapolação para saber a diferença de temperatura e a quantidade de células de Peltier que serão necessárias para se obter uma tensão de 14V. Esta tensão será usada como tensão objetivo uma vez que seria a tensão necessária para a alimentação de outros dispositivos eletrônicos.

Figura 38 – Gráfico Tensão X Quantidade de células de Peltier para o primeiro nível de Temperatura



Fonte: A Autora (2020)

$$y = 0,8084X + 1,224 \quad (5.2)$$

onde  $y$  é a tensão média, dada em Volts, e  $X$  é a quantidade de células de Peltier. E a relação  $R^2$  é igual a 1, logo a aproximação linear utilizada é coerente com o encontrado por Brito (2017).

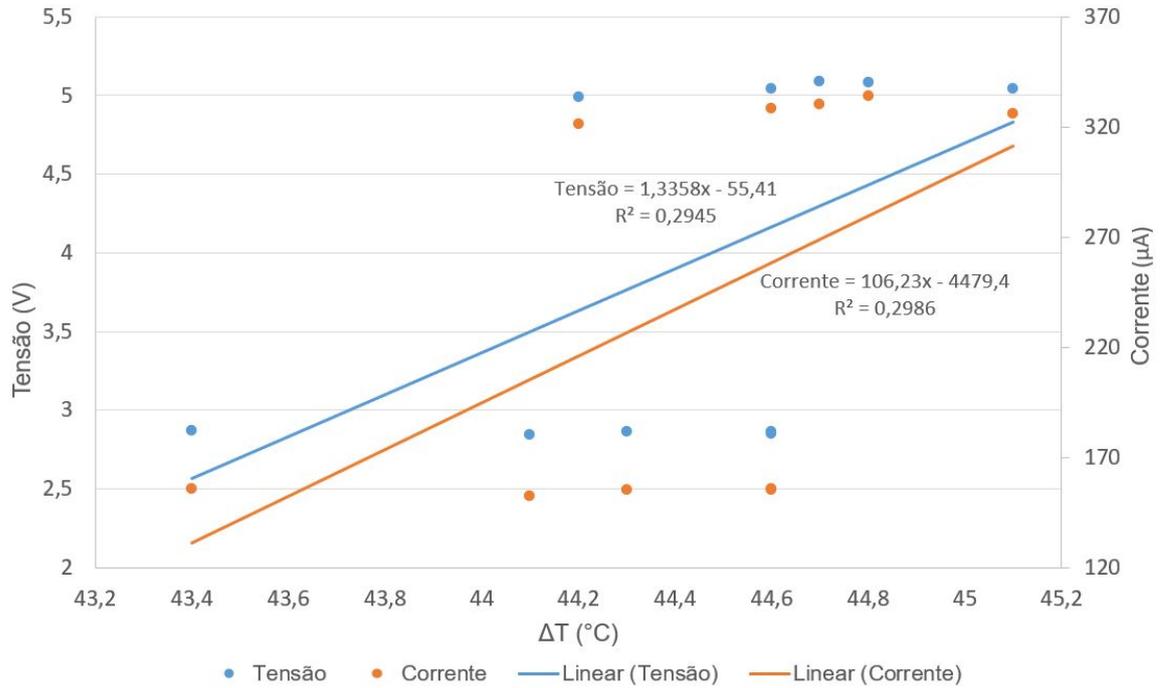
Utilizando-se a equação obtida para a reta na Figura 38, Equação 5.2, para uma diferença de temperatura média de  $81^\circ\text{C}$ , precisa-se de 16 células de Peltier para gerar 14V e 14 células de Peltier para gerar 12V.

Para o segundo nível de temperatura  $T_2$ , obteve-se a relação entre a variação de temperatura, a tensão e a corrente geradas. Estas relações podem ser visualizadas na Figura 39.

Como no gráfico obtido para o primeiro nível de temperatura, também é possível se observar a linearidade dos valores pontuais obtidos para o segundo nível de temperatura analisando-se os conjuntos de 5 e 10 células de Peltier separadamente. Onde, o conjunto de pontos inferior e o conjunto de pontos superior na Figura 39 representam a configuração com 5 e 10 células, respectivamente.

A partir dos dados coletados para o nível de temperatura intermediária (segundo nível de temperatura), traçou-se uma reta, visualizada na Figura 40, para se determinar a quantidade de células de Peltier que seriam necessárias para se atingir uma tensão de 14V. Utilizou-se a

Figura 39 – Gráfico Tensão e corrente X  $\Delta T$  para o segundo nível de Temperatura



Fonte: A Autora (2020)

equação da reta obtida (Equação 5.3) para calcular a quantidade de células de Peltier seriam necessárias.

$$y = 0,4384X + 0,664 \quad (5.3)$$

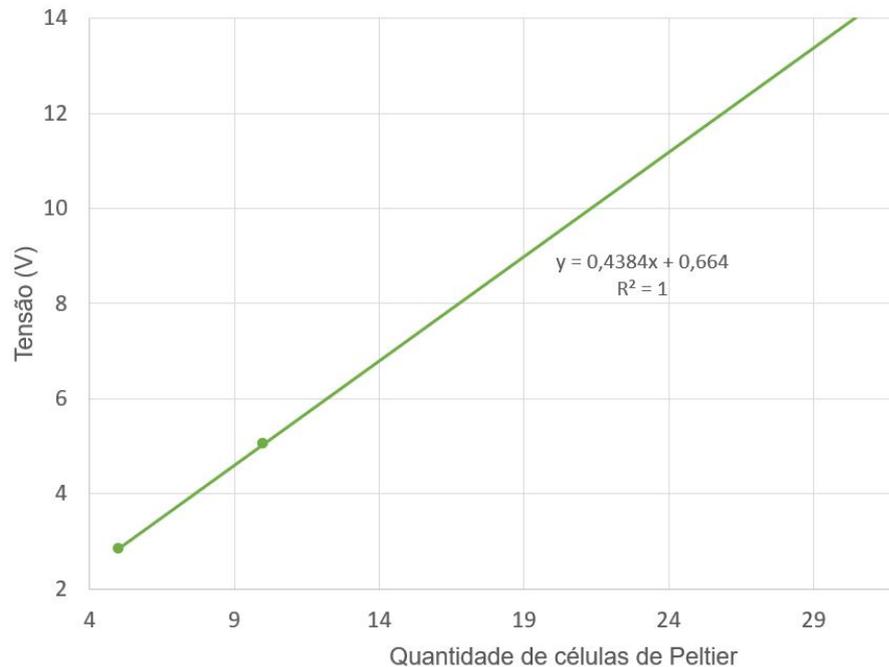
em que  $y$  é a tensão média, dada em Volts, e  $X$  representa a quantidade de células de Peltier. E a relação  $R^2$  é igual a 1, logo a aproximação linear utilizada é coerente com o encontrado por Brito (2017).

Utilizando a equação da reta obtida, Equação 5.3, para uma diferença de temperatura média de 44,44°C, precisa-se de 31 células de Peltier para gerar 14V e 26 células de Peltier para gerar 12V.

Para o terceiro nível de temperatura  $T_3$ , obteve-se a relação entre a variação de temperatura e a tensão. Esta relação pode ser visualizada na Figura 41. Não foi possível obter os valores para a corrente para esse nível de temperatura pois a corrente é muito pequena para esta variação de temperatura.

Como nos gráficos anteriores para cada nível de temperatura, também é possível se observar a linearidade dos valores pontuais obtidos para a tensão no terceiro nível de temperatura analisando-se os conjuntos de 5 e 10 células de Peltier separadamente. Onde, o conjunto de pontos inferior e o conjunto de pontos superior na Figura 41 representam a configuração com 5 e 10 células, respectivamente.

Figura 40 – Gráfico Tensão X Quantidade de células de Peltier para o segundo nível de Temperatura



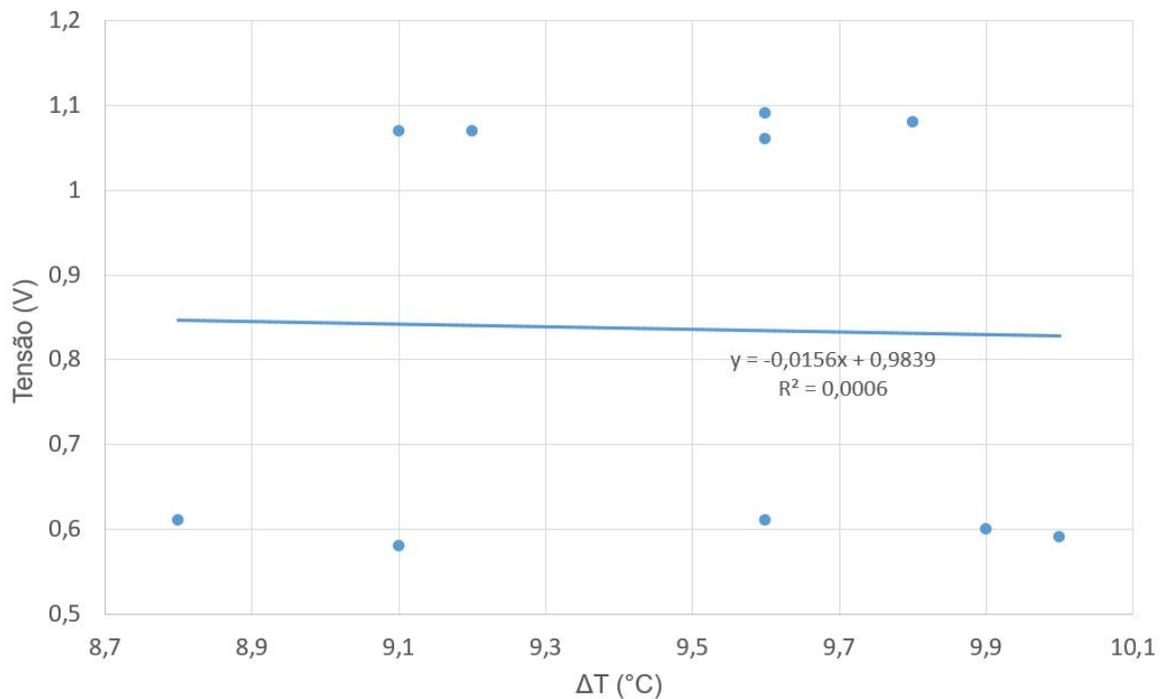
Fonte: A Autora (2020)

Portanto, como nos casos anteriores, traçou-se uma reta, visualizada na Figura 42, para determinar a quantidade de células de peltier necessária para se obter 14V. Utilizando-se a equação da reta obtida no gráfico, Equação 5.4, para uma diferença de temperatura média de 9,47 °C, precisa-se de 146 células de Peltier para gerar 14V para este nível de temperatura e 125 células de Peltier para gerar 12V.

$$y = 0,0952X + 0,122 \quad (5.4)$$

onde  $y$  é a tensão média, dada em Volts, e  $X$  é a quantidade de células de Peltier. E a relação  $R^2$  é igual a 1, logo a aproximação linear utilizada é coerente com o encontrado por Brito (2017).

A partir dos dados coletados da tensão e da corrente geradas pelas células de Peltier, em três diferentes temperaturas, verificou-se que a variação de temperatura está diretamente ligada a quantidade de células de Peltier necessárias. Para o sistema gerar 14V, obtêm-se que para uma diferença de temperatura de 81,01°C, precisa-se de 16 células de Peltier. Enquanto que para uma diferença de temperatura de 44,44°C, precisa-se de 31 células de Peltier. E finalmente, para uma diferença de temperatura de 9,47°C, precisa-se de 146 células de Peltier, como pode ser visualizado na Tabela 6. Verificou-se também que quando a diferença de temperatura é muito

Figura 41 – Gráfico Tensão X  $\Delta T$  para o terceiro nível de Temperatura

Fonte: A Autora (2020)

pequena, a corrente gerada é muito baixa e, conseqüentemente, a potência fornecida também será muito baixa.

Tabela 6 – Resultados obtidos para a primeira análise

Tensão (V)	$\Delta$ (°C)	Nº de Células de Peltier
12,00	81,01	14
12,00	44,40	26
12,00	9,47	125
14,00	81,01	16
14,00	44,40	31
14,00	9,47	146

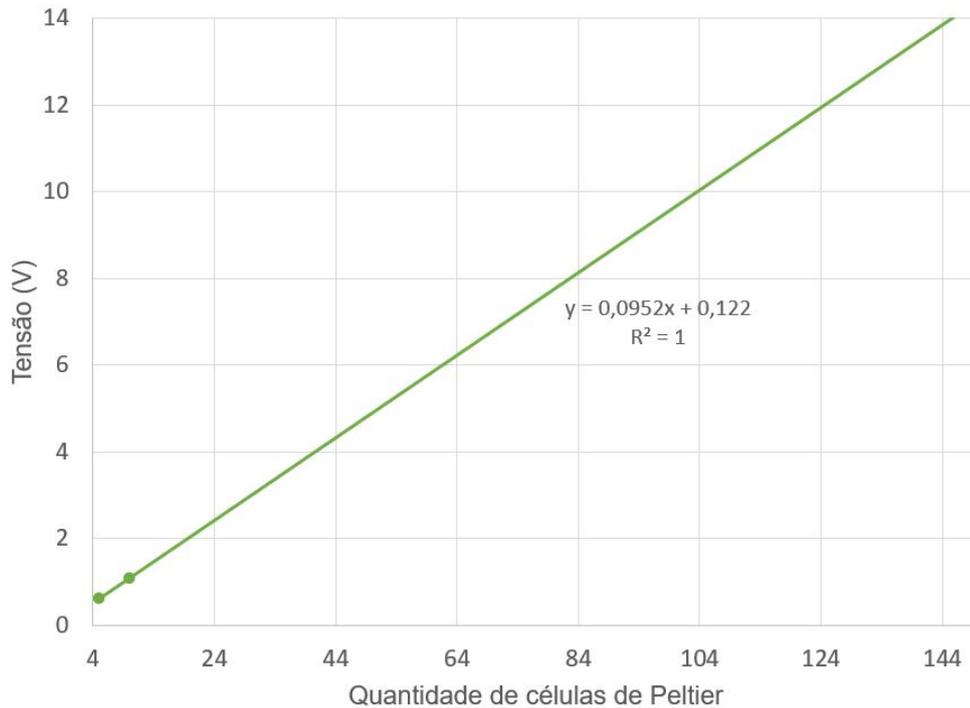
Fonte: A Autora (2020)

### 5.1.2 Segunda Análise

Para esta análise, foram gerados gráficos de acordo com os dados da Tabela 8, no Apêndice 6. Na Figura 43 observa-se a variação da tensão e a variação de temperatura do protótipo para cada uma das duas configurações, de 5 e 10 células.

Para esta análise também utilizou-se a relação de linearidade entra as principais variáveis de saída do sistema e a temperatura encontrada por Brito (2017). Portanto, para otimizar os

Figura 42 – Gráfico Tensão X Quantidade de células para o terceiro nível de Temperatura



Fonte: A Autora (2020)

conjuntos de dados, traçou-se uma reta de otimização. Para esta reta fez-se uma extrapolação e obteve-se a equação para cada reta a fim de obter a tensão que será gerada ao se acoplar ao motor. A equação obtida para a configuração com 5 módulos de Peltier é mostrada na Equação 5.5 e a equação obtida para a configuração com 10 módulos é mostrada na Equação 5.6.

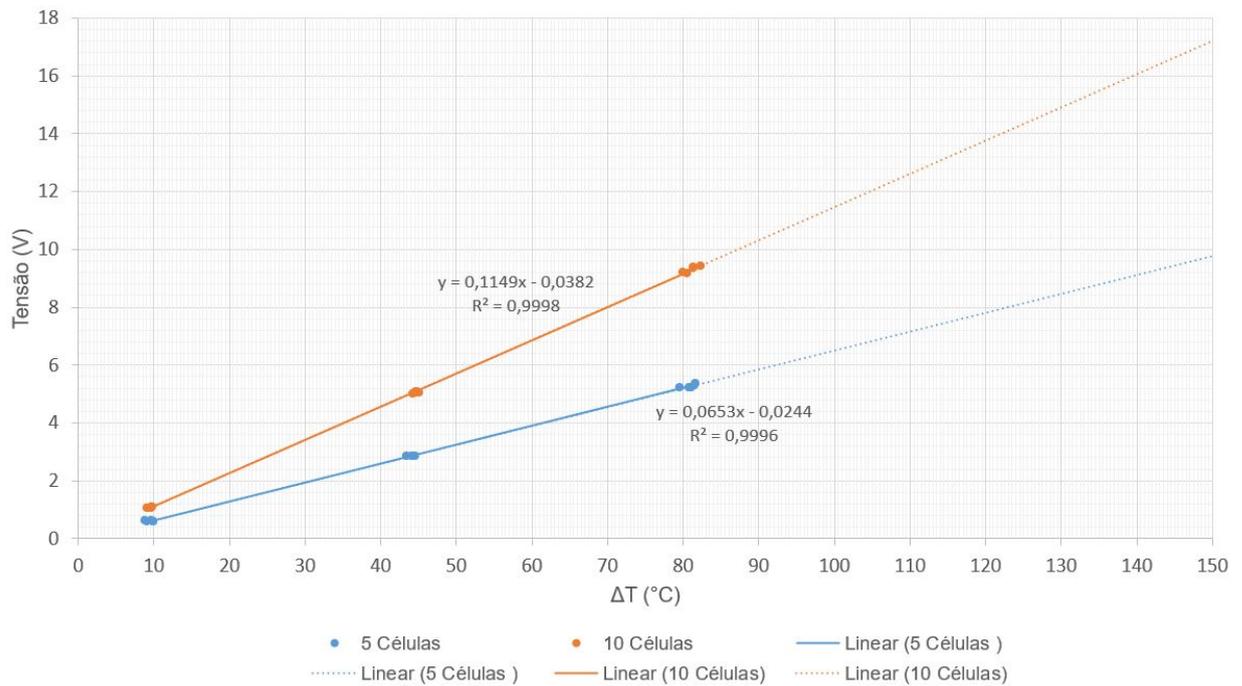
$$V = 0,0653X - 0,0244 \quad (5.5)$$

onde  $V$  é a tensão média, dada em Volts, e  $X$  é a variação de temperatura, dada em °C. E a relação  $R^2$  é igual a 0,9996, logo a aproximação linear utilizada é coerente com o encontrado por Brito (2017).

$$V = 0,1149X - 0,0382 \quad (5.6)$$

onde  $V$  é a tensão média, dada em Volts, e  $X$  é a variação de temperatura, dada em °C. E a relação  $R^2$  é igual a 0,9998, logo a aproximação linear utilizada é coerente com o encontrado por Brito (2017).

Foram gerados também gráficos entre a variação de temperatura do protótipo e a corrente gerada para cada uma das duas configurações, de 5 e 10 células. Este gráfico pode ser visualizado na Figura 44.

Figura 43 – Gráfico Tensão X  $\Delta T$  para as duas configurações

Fonte: A Autora (2020)

Para cada conjunto de dados, obteve-se as equações de cada reta de otimização, a fim de obter a corrente que será gerada ao se acoplar ao motor. A equação obtida para a configuração com 5 módulos de Peltier é mostrada na Equação 5.7 e a equação obtida para a configuração com 10 módulos é mostrada na Equação 5.8.

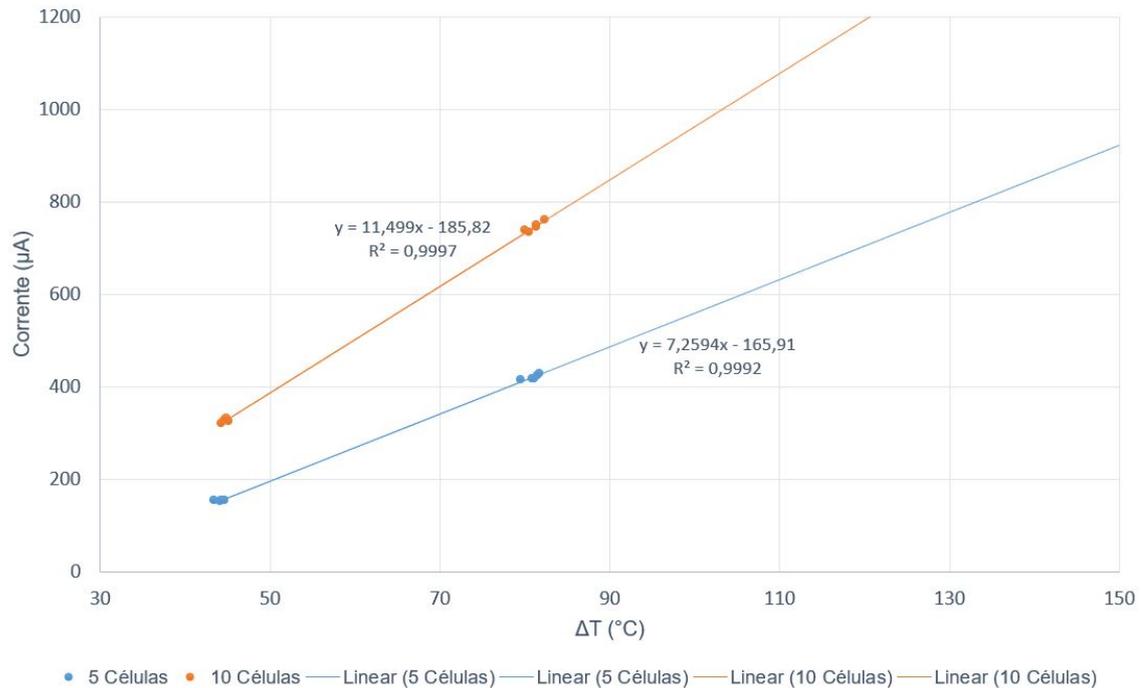
$$I = 7,2594X - 165,91 \quad (5.7)$$

onde  $I$  é a corrente média, dada em miliampère, e  $X$  é a variação de temperatura, dada em °C. E a relação  $R^2$  é igual a 0,9992, logo a aproximação linear utilizada é coerente com o encontrado por Brito (2017).

$$I = 11,499X - 185,82 \quad (5.8)$$

onde  $I$  é a corrente média, dada em miliampère, e  $X$  é a variação de temperatura, dada em °C. E a relação  $R^2$  é igual a 0,9997, logo a aproximação linear utilizada é coerente com o encontrado por Brito (2017).

A partir dos dados informados por Brito (2017), a temperatura dos gases de exaustão é de 921,6 °C, e para a análise está se considerando que o sistema não possui resfriamento externo, logo a temperatura externa é de aproximadamente a temperatura ambiente de 35 °C.

Figura 44 – Gráfico Corrente X  $\Delta T$  para as duas configurações

Fonte: A Autora (2020)

Logo, a diferença de temperatura que foi utilizada nas equações para se obter os valores da tensão, corrente e potência que o protótipo geraria quando acoplado no motor é de  $\Delta T = 886,6$  °C. Os valores obtidos substituindo a variação de temperatura nas equações encontradas podem ser visualizadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados obtidos para  $\Delta T = 886,60^{\circ}\text{C}$ 

Células de Peltier	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (W)
5	57,87	6,27	0,36
10	101,83	10,01	1,02

Fonte: A autora (2021)

Alguns dos resultados obtidos mostram-se em concordância com os resultados apresentados por outros trabalhos da literatura. Como já foi apresentado, o trabalho que foi levado mais em consideração para efeito de análise, foi o desenvolvido por Brito (2017). Apesar de se tratarem de trabalhos semelhantes quanto a proposta e a geometria utilizada, os materiais e equipamentos utilizados para os testes são diferentes. Logo, esta comparação é apenas qualitativa, já que dificilmente dois trabalhos da literatura terão todos os parâmetros iguais.

Os valores de potência e corrente elétrica divergem do encontrado por Brito (2017), os valores encontrados por ele para a corrente elétrica foi de 44,8A e para a potência foi de

2,267KW, enquanto que os valores obtidos nos testes são bem menores. Enquanto que a tensão encontrada por ele foi de 101,2V e a encontrada através da análise foi de 101,83V.

A divergência entre os valores encontrados podem ter ocorrido por diversos fatores, mas os que ficaram mais evidentes está relacionado a composição do TEG, pois o modelo de TEG analisado por Brito (2017) é semelhante ao utilizado pela BMW, ou seja, é formado por trocadores de calor, enquanto que o desenvolvido no presente trabalho utilizou-se células de Peltier. Um fator importante também para o baixo valor de corrente e conseqüentemente da potência, é a ligação elétrica dos módulos. Como se desejava alcançar a maior tensão possível para a configuração utilizada, os módulos foram ligados eletricamente em série, e sabe-se que quando se trabalha com equipamentos em série sua corrente tende a ser menor e sua tensão maior. Outra maneira de se trabalhar seria ligando os módulos eletricamente em paralelo para se obter uma corrente gerada maior.

Para fins de análise seria vantajoso testar outras geometrias que possibilitem células de Peltier em todas as faces, assim como ligar alguns módulos em série e em paralelo para se obter o maior valor possível para a tensão e para a corrente elétrica. Algumas geometrias que precisariam de equipamentos melhores para desenvolver, mas que talvez se obtenha um desempenho melhor é a ortogonal ou a pentagonal. Também para trabalhos futuros, seria interessante realizar um estudo do fluxo dos gases no interior do protótipo, para saber em quais das faces do protótipo possui melhor fluxo de calor. Assim como calcular a perda de calor para o ambiente com o uso de uma câmera termográfica.

Foi necessário supor alguns dados para fins de análise, pois não foi possível realizar a etapa de acoplamento do protótipo ao motor estacionário que se encontra no laboratório do IFPE, que seria a proposta inicial deste trabalho. Esta etapa fica como proposta para trabalhos futuros, pois após o acoplamento pode-se obter muitos dados para análise assim como implementações ao protótipo proposto.

Segundo Junior (2016) as temperaturas interna e externa ao protótipo, assim como a variação de temperatura, aumentam ao longo do tempo, portanto, a temperatura é um dos fatores que mais influenciam no desempenho do sistema. Na Tabela 8, no Apêndice 6, não foi possível obter os valores para a corrente para uma variação de temperatura muito pequena.

Ao longo das simulações percebeu-se que para a configuração utilizada quanto maior o número de módulos termoelétricos, maior a potência total gerada. Outra forma de melhorar o desempenho do protótipo proposto seria implementar um sistema de resfriamento para a região externa, fazendo com que a diferença de temperatura seja maior. Para tentar simular essa refrigeração, os testes foram realizados em um ambiente refrigerado, porém não foi muito eficiente, pois a refrigeração não era direcionada exclusivamente ao protótipo. Logo, seria vantajoso o desenvolvimento de um sistema de refrigeração para ser acoplado ao protótipo e que não ocupe muito espaço. Também deve-se melhorar o isolamento entre a parte interna e externa do protótipo para não haver escape dos gases quentes, pois isso influenciará na temperatura do lado frio dos módulos.

Quanto maior o diferencial de temperatura entre as faces do módulo, maior a tensão e consequentemente maior a potência produzida pelo mesmo. Entretanto, na fase dos testes não foi realizada a medição das temperaturas da superfície dos módulos e sim das áreas interna e externa ao protótipo. Esse pode ter sido um dos fatores que influenciou no desempenho, pois com os dados obtidos não é possível saber se a utilização das aletas melhorou a condução de calor para a superfície dos módulos.

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho projetou-se um sistema simples a ser acoplado na tubulação de escape de um motor de combustão interna. Apesar da escolha dos dados de um motor de combustão interna, o sistema pode ser facilmente adaptado a outros processos que desperdiçam energia térmica na forma de calor.

O protótipo foi modelado com a ajuda do software SolidWorks e foi possível o seu desenvolvimento utilizando materiais disponíveis no laboratório. O protótipo foi desenvolvido para reaproveitamento de energia a partir do calor residual. Verificou-se as vantagens e desvantagens de se utilizar células termoelétricas (células de Peltier) para a recuperação de calor. Apesar de as células termoelétricas possuírem rendimento térmico baixo, mostraram-se como alternativas viáveis para a recuperação de calor residual, que pode ser aplicado a motores de combustão interna e outros processos térmicos que possuem perdas térmicas que podem ser recuperadas como calor residual, garantindo a conversão de energia térmica que seria desperdiçada em energia elétrica de maneira simples e bastante confiável. Outra vantagem de se utilizar estas células em detrimento a outras formas de recuperação de calor em motores de combustão é o seu tamanho compacto. No entanto, devido a sua baixa eficiência, a necessidade de se agrupar uma grande quantidade de módulos em um único mecanismo pode acabar se traduzindo em desvantagem.

Uma aplicação para este sistema seria fornecer energia para uma bateria de automóvel, através da geração de energia a partir da combustão da gasolina. Sabe-se que uma bateria de automóvel necessita de 12V para ser carregada, portanto a tensão ideal para se obter do protótipo desenvolvido seria um pouco maior. Os experimentos mostraram que é possível obter 14V com o uso de poucos módulos termoelétricos em série, para uma diferença de temperatura em torno de 80°C. No entanto, a baixa corrente observada nos experimentos forçariam à necessidade do uso de um grande número de módulos termoelétricos para o carregamento adequado da bateria ou alimentação dos dispositivos eletrônicos.

Entretanto, ao simular com a diferença de temperatura mais próxima da realidade de um motor de combustão interna, uma variação de aproximadamente 880 °C, a quantidade de módulos utilizada já é suficiente para gerar os 14V. Logo, percebe-se que a variação de temperatura está diretamente ligada à sua capacidade de geração de energia. Ou seja, quanto maior for essa diferença maior será a quantidade de voltagem gerada.

Outras medições e simulações usando diferentes materiais semicondutores são necessários para identificar com precisão o potencial de módulos termoelétricos nas aplicações em automóveis.

Outra forma de melhorar o desempenho do protótipo seria implementar um sistema de resfriamento para a região externa que seja acoplado ao protótipo e que não ocupe muito espaço. Também pode-se melhorar o isolamento entre a parte interna e a parte externa, com o uso de melhores materiais isolantes, como por exemplo lã de vidro. Assim como calcular a perda de calor para o ambiente e analisar o fluxo de calor no interior do protótipo.

## REFERÊNCIAS

- AFONSO, J. U. B. **Gerador termoeétrico para escape de automóvel com controlo de temperatura**. 2014. Dissertação de mestrado (Monografia) – Universidade do Minho, Portugal, 2014.
- BERMANN, C. **Crise ambiental e as energias renováveis**. [S.l.], 2008. Disponível em: <[http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0009-67252008000300010&lng=en&nrm=iso](http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252008000300010&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 27 maio 2019.
- BRITO, M. A. R. de. **análise da utilização de geradores termoeétricos na recuperação de calor residual de exaustão em um motor de combustão interna**. 2017. Dissertação de conclusão de curso (Monografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- BRITO, M. A. R. de; ARAÚJO, M. C. Modelagem e análise de recuperação de calor residual de exaustão em um motor de combustão interna bicomustível com geradores termoeétricos. In: **XIII Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica. Lisboa, PT: [s.n.], 2017**. [S.l.]: IEEE, 2017.
- BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**: Volume 1. 5. ed. São Paulo: AMGH, 2013.
- CASANO, G.; PIVA, S. Experimental investigation of the performance of a thermoelectric generator based on Peltier cells. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Elsevier BV, v. 35, n. 4, p. 660–669, maio 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.12.016>>.
- CHEN, W.-H.; LIAO, C.-Y.; HUNG, C.-I.; HUANG, W.-L. Experimental study on thermoelectric modules for power generation at various operating conditions. **Energy**, Elsevier BV, v. 45, n. 1, p. 874–881, set. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.076>>.
- CHEN, W.-H.; LIAO, C.-Y.; WANG, C.-C.; HUNG, C.-I. Evaluation of power generation from thermoelectric cooler at normal and low-temperature cooling conditions. **Energy for Sustainable Development**, Elsevier BV, v. 25, p. 8–16, abr. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.12.004>>.
- COUTO, E. F. D.; ALVES, L. M. Medição do coeficiente seebeck de amostras semicondutoras a base de si-ge. **Centro Interdisciplinar de Pesquisa em Materiais, Universidade Estadual de Ponta Grossa-CIPEM-UEPG, Ponta Grossa -PR**, 2010.
- DUTRA, N. G.; MELO, S. R. **Estudo do aproveitamento dos gases de exaustão de um motor de combustão interna para geração de energia**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Monografia) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2014.
- EDER, A.; LINDE, M. **Efficiente and Eynamic – The BMW Group Roadmap for the Application of Thermoelectric Generators**. 2011.
- ELSHEIKH, M. H.; SHNAWAH, D. A.; SABRI, M. F. M.; SAID, S. B. M.; HASSAN, M. H.; BASHIR, M. B. A.; MOHAMAD, M. A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 30, p. 337–355, fev. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.027>>.

FERNANDES, A. E. S. dos S. **Conversão de energia com células de Peltier**. 2012. Dissertação de mestrado (Monografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2012.

GRUPPE, R. **Energias renováveis e sua importância para o desenvolvimento**. [S.l.], 2018. Disponível em: <<http://richtergruppe.com.br/energias-renovaveis-e-sua-importancia-para-o-desenvolvimento/>>. Acesso em: 28 maio 2019.

GUIMARÃES, F. **Efeito Peltier e Seebeck**. 2018. Disponível em: <<https://mundoprojetado.com.br/efeito-peltier-e-seebeck/>>. Acesso em: 2019-20-12.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 1988.

HSIAO, Y.; CHANG, W.; CHEN, S. A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine. **Energy**, Elsevier BV, v. 35, n. 3, p. 1447–1454, mar. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.11.030>>.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

ISMAIL, B.; AHMED, W. Thermoelectric power generation using waste-heat energy as an alternative green technology. **Recent Patents on Electrical Engineering**, Bentham Science Publishers Ltd., v. 2, n. 1, p. 27–39, jan. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.2174/1874476110902010027>>.

JUNIOR, C. S.; STRUPP, N. C.; LEMKE, N. C.; KOEHLER, J. Modeling a thermoelectric HVAC system for automobiles. **Journal of Electronic Materials**, Springer Science and Business Media LLC, v. 38, n. 7, p. 1093–1097, mar. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11664-009-0749-8>>.

JUNIOR, H. V. K. **Projeto de gerador termoelétrico para recuperação de energias residuais**. 2016. Dissertação de conclusão de curso (Monografia) – Universidade Tecnológica do Paraná, Guarapuava, 2016.

JUNIOR, O. H. A. **Protótipo de um microgerador termoelétrico para captação de energias residuais baseado no Efeito Seebeck com sistema de transferência de calor intercambiável**. 2014. Dissertação de Doutorado (Monografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2014.

MADDUX, H. N. and J. E.; TAYLOR, P. High temperature thermoelectric materials for waste heat regeneration. In: **ARL-TR-3611**. [S.l.]: Army research lab adelphi md sensors and electron devices directorate, 2013.

MICHAELWICZ, J. S.; SILVA, J. V. C.; BRITO, G. G. de; SANTOS, R. de A.; COSTA, J. Â. P. da. Estudo da geração de gás de Brown a partir da energia remanescente de um acumulador automotivo. In: **XIII Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica**. Lisboa, PT: [s.n.], 2017. [S.l.]: IEEE, 2017.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

- NIA, M. H.; NEJAD, A. A.; GOUDARZI, A.; VALIZADEH, M.; SAMADIAN, P. Cogeneration solar system using thermoelectric module and fresnel lens. **Energy Conversion and Management**, Elsevier BV, v. 84, p. 305–310, ago. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.041>>.
- NUNES, H. J. L.; BARBOSA, A. T. R. Efeito seebeck no aumento de eficiência de uma caldeira. **13º Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica, XIII CIBEM**, p. 1093–1097, Outubro 2017.
- RIFFAT, S.; MA, X. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier BV, v. 23, n. 8, p. 913–935, jun. 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s1359-4311\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/s1359-4311(03)00012-7)>.
- ROWE, D. M. **Thermoelectrics handbook: macro to nano**. 1. ed. [S.l.]: CRC press, 2006.
- SAIDUR, R.; REZAEI, M.; MUZAMMIL, W.; HASSAN, M.; PARIJA, S.; HASANUZZAMAN, M. Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 16, n. 8, p. 5649–5659, out. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.018>>.
- SANTOS, R. F. M. dos; SPINELLI, J. E. Análise da geração de energia elétrica por meio da utilização de conversores do tipo TEG em lingotamento contínuo de aços. **Matéria (Rio de Janeiro)**, FapUNIFESP (SciELO), v. 24, n. 3, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1517-707620190003.0778>>.
- SAQR, K. M.; MANSOUR, M. K.; MUSA, M. N. Thermal design of automobile exhaust based thermoelectric generators: Objectives and challenges. **International Journal of Automotive Technology**, Springer Science and Business Media LLC, v. 9, n. 2, p. 155–160, abr. 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12239-008-0020-y>>.
- SOUZA, R. M. A. **Gerador termoelétrico para escape do automóvel com controle de temperatura**. 2011. Dissertação de mestrado (Monografia) – Universidade do Minho, Portugal, 2011.
- TRADING, H. I. **Datasheet Thermoelectric Cooler TEC1-12706**. 2016. Disponível em: <<http://www.hebeiltd.com.cn/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf>>. Acesso em: 2019-20-12.
- WANG, T.; ZHANG, Y.; PENG, Z.; SHU, G. A review of researches on thermal exhaust heat recovery with rankine cycle. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 15, n. 6, p. 2862–2871, ago. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.015>>.
- WILL, F.; BORETTI, A. A new method to warm up lubricating oil to improve the fuel efficiency during cold start. **SAE International Journal of Engines**, SAE International, v. 4, n. 1, p. 175–187, abr. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.4271/2011-01-0318>>.
- YANG, J. Potential applications of thermoelectric waste heat recovery in the automotive industry. In: **ICT 2005. 24th International Conference on Thermoelectrics, 2005**. IEEE, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ict.2005.1519911>>.

## APÊNDICE A - TABELA COM TODOS OS DADOS COLETADOS

Tabela 8 – Dados obtidos das duas configurações com 5 e 10 células de Peltier

Nível	Nº de Células	$T_i(^{\circ}\text{C})$ ( $\pm 1, 0\%$ )	$T_{ext}(^{\circ}\text{C})$ ( $\pm 1, 5$ )	$\Delta T$ ( $\pm 1, 5$ )	Tensão (V) ( $\pm 0, 5\%$ )	Corrente ( $\mu\text{A}$ ) ( $\pm 1, 2\%$ )	Potência (mW) ( $\pm 10, 24\%$ )
T1	5	106,00	24,50	81,50	5,30	425,00	2,25
T1	5	106,30	24,60	81,70	5,36	430,00	2,30
T1	5	103,90	24,40	79,50	5,23	417,00	2,18
T1	5	105,30	24,20	81,10	5,22	418,00	2,18
T1	5	105,10	24,30	80,80	5,22	418,00	2,18
T1	10	106,70	25,30	81,40	9,40	747,00	7,02
T1	10	107,40	25,10	82,30	9,41	761,00	7,16
T1	10	106,10	24,80	81,30	9,34	751,00	7,01
T1	10	104,90	24,40	80,50	9,17	735,00	6,74
T1	10	104,50	24,50	80,00	9,22	740,00	6,82
T2	5	69,00	24,40	44,60	2,85	155,00	0,44
T2	5	68,40	24,30	44,10	2,84	152,40	0,43
T2	5	68,80	24,20	44,60	2,86	155,70	0,45
T2	5	67,80	24,40	43,40	2,87	155,90	0,45
T2	5	68,40	24,10	44,30	2,86	155,40	0,44
T2	10	68,30	24,10	44,20	4,99	321,20	1,60
T2	10	69,00	24,40	44,60	5,04	328,20	1,65
T2	10	69,10	24,40	44,70	5,09	330,10	1,68
T2	10	69,60	24,50	45,10	5,04	326,10	1,64
T2	10	69,40	24,60	44,80	5,08	334,10	1,70
T3	5	33,50	23,90	9,60	0,61	-	-
T3	5	33,00	23,90	9,10	0,58	-	-
T3	5	33,80	23,80	10,00	0,59	-	-
T3	5	33,30	23,40	9,90	0,60	-	-
T3	5	32,00	23,20	8,80	0,61	-	-
T3	10	33,70	24,60	9,10	1,07	-	-
T3	10	34,20	24,60	9,60	1,06	-	-
T3	10	33,90	24,30	9,60	1,09	-	-
T3	10	33,90	24,70	9,20	1,07	-	-
T3	10	34,10	24,30	9,80	1,08	-	-

Fonte: A Autora (2020)

## ANEXO A - DATASHEET DO FABRICANTE



Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd.

Thermoelectric  
Cooler

TEC1-12706

## Performance Specifications

Hot Side Temperature (° C)	25° C	50° C
Qmax (Watts)	50	57
Delta Tmax (° C)	66	75
I <sub>max</sub> (Amps)	6.4	6.4
V <sub>max</sub> (Volts)	14.4	16.4
Module Resistance (Ohms)	1.98	2.30



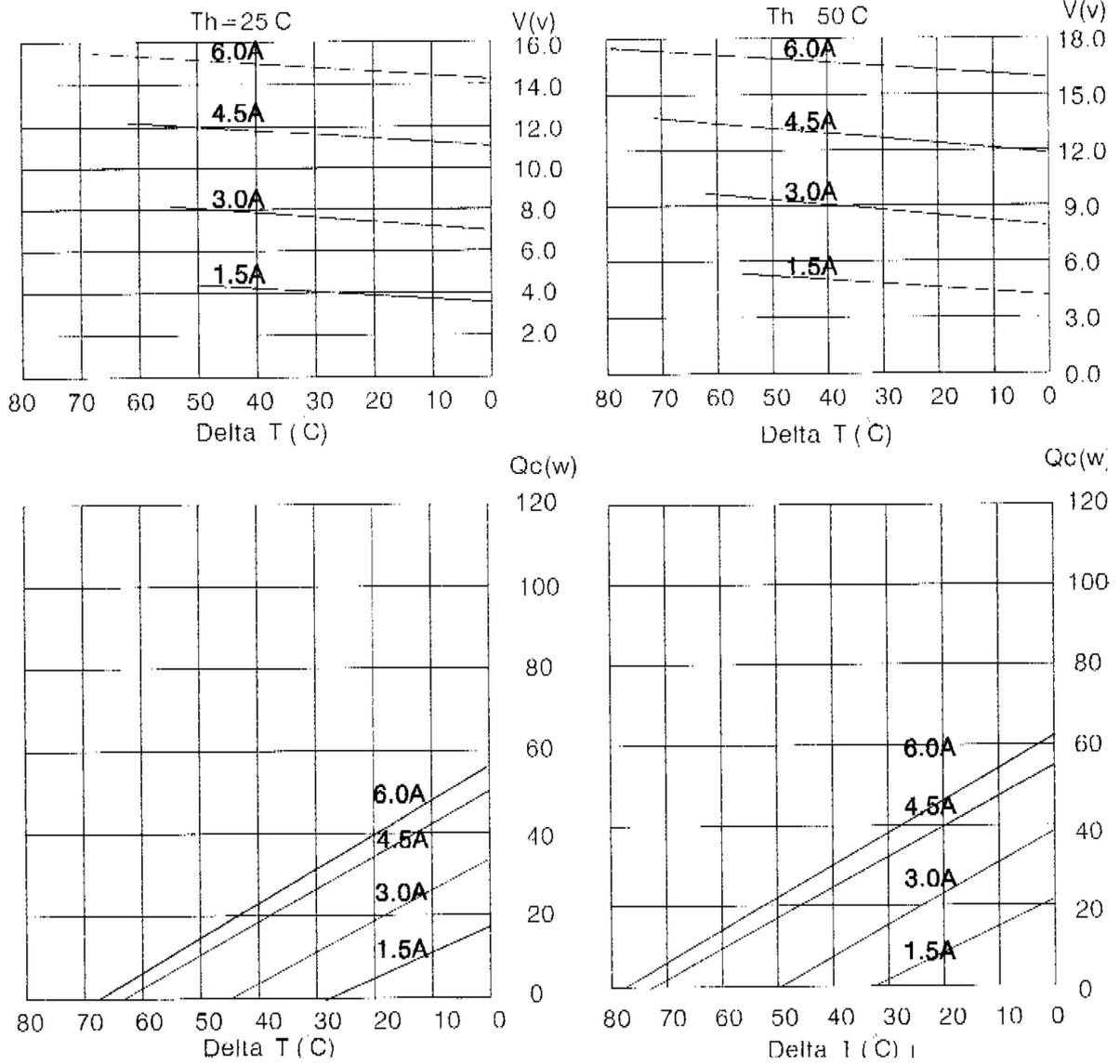


Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd.

Thermoelectric Cooler

TEC1-12706

Performance curves:

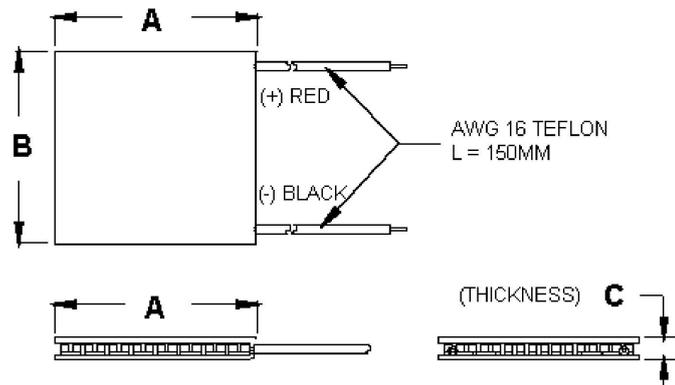




Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd.

Thermoelectric  
Cooler

TEC1-12706



Ceramic Material: Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  
Solder Construction: 138°C, Bismuth Tin (BiSn)

#### Size table:

A	B	C			
40	40	3.9			

#### Operating Tips

- Max. Operating Temperature: 138°C
- Do not exceed  $I_{max}$  or  $V_{max}$  when operating module.
- Life expectancy: 200,000 hours
- Please consult HB for moisture protection options (sealing).
- Failure rate based on long time testings: 0.2%.