

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**HELIO VAN KRANENBURG JUNIOR**

**PROJETO DE GERADOR TERMOELÉTRICO PARA RECUPERAÇÃO  
DE ENERGIAS RESIDUAIS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2**

**GUARAPUAVA**

**2016**

**HELIO VAN KRANENBURG JUNIOR**

**PROJETO DE GERADOR TERMOELÉTRICO PARA RECUPERAÇÃO  
DE ENERGIAS RESIDUAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentada como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel, em  
engenharia mecânica, da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dra. Raquel da Cunha  
Ribeiro da Silva

**GUARAPUAVA**

**2016**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Guarapuava

Diretoria de Graduação  
Coordenação de Engenharia Mecânica  
Engenharia Mecânica



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **PROJETO DE GERADOR TERMOELÉTRICO PARA RECUPERAÇÃO DE ENERGIAS RESIDUAIS**

por

**HELIO VAN KRANENBURG JUNIOR**

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 30 de novembro de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Dra. Raquel da Cunha Ribeiro da Silva  
Profa. Orientadora

---

MSc Henrique Ajuz Holzmann  
Membro Titular

---

MSc. Paul Adrian Delgado Maldonado  
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho a toda a minha família, pelo apoio e suporte durante toda essa jornada, em especial a minha amada Janaína, por me inspirar cada dia mais e mais. Aos amigos que me apoiaram, e a todos professores que me influenciaram.

Eu só quero ser livre  
Livre como o vento  
E se o vento enche minhas velas, então  
Eu nunca estou voltando novamente  
(Tom Keifer, 1990)

## RESUMO

JUNIOR, Helio Van Kranenburg. **Projeto de gerador termoelétrico para recuperação de energias residuais**. 2016. 51 pg. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2016.

A busca pelo aproveitamento de energias consideradas perdidas vem crescendo cada vez mais nos dias atuais. Uma forma de reutilizar a energia em forma de calor é através de geradores termoelétricos, estes usam módulos de geração que funcionam através de efeito Seebeck, apresentando baixa eficiência, mas por não possuírem partes móveis os tornam muito confiáveis. Este trabalho tem como objetivo geral projetar e construir um gerador termoelétrico utilizando como fonte de energia um soprador térmico com o intuito de simular os gases de exaustão de um escapamento, analisar a viabilidade térmica e dados de geração de energia. O protótipo foi construído utilizando um tubo onde foi instalado aletas para aumento da transferência de calor tanto interna como externa dos módulos. A potência obtida se relaciona diretamente com o módulo utilizado, módulos fabricados especialmente para a produção de energia terão melhores resultados, utilizou-se no experimento dois módulos Peltier ligados termicamente em paralelo e eletricamente em série, tendo como temperatura máxima do lado quente aproximadamente 140°C e temperatura do lado frio como 40°C obteve-se uma potência de 1,5 watts e 2,78 volts de saída.

**Palavras-chave:** Aproveitamento de calor. ETEG. Gerador termoelétrico.

## ABSTRACT

JUNIOR, Helio Van Kranenburg. **Design of a thermogenerator for recovery of heat lost**. 2016. 51 pg. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Federal Technology University - Parana. Guarapuava, 2016.

The search for energies that are considered lost is growing more and more in the present day. One way to reuse an energy, in the form of heat, is through thermoelectric generators, these generation modules (TEG) work through Seebeck effect. This paper has as general objective for design and construct a thermoelectric generator using as source of power a heat gun, to simulate the exhaust gases, analyze the thermal viability of installation. The prototype was constructed using a tube where fins was installed on both internal and external walls to improve the heat transfer where the modules were installed. The power obtained by the generator is directly connected with the module used, the modules manufactured especially for energy generation will have better results, it was used in this experiment two Peltier modules connected thermally in parallel and electrically in series, having as maximum temperature of the hot side around 140 ° C and on the cold side the temperature was around 40 ° C, with this difference of temperature we obtained a power of 1.5 watts and 2.78 volts.

**Keywords:** Heat recovery. ETEG. Thermoelectric generator.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Dissipação de energias de um MCI .....	12
Figura 2 - Evolução da potência obtida pela BMW.....	18
Figura 3 - Relação entre a velocidade do veículo x potência obtida x consumo de combustível. ....	19
Figura 4 – Modelo de Termopar .....	20
Figura 5 – Valores de variação do coeficiente de Seebeck em relação a temperatura .....	22
Figura 6 - Gerador termoelétrico composto por um termopar de um estágio. ....	23
Figura 7 – Figura de Mérito vs Temperatura .....	25
Figura 8 – Módulo termoelétrico.....	27
Figura 9 – Módulo termoelétrico em cascata.....	27
Figura 10 – Esquema elétrico de um veículo .....	28
Figura 11 - Dimensões do Módulo Termoelétrico.....	31
Figura 13 – Soprador Térmico Gamma Hg025br1 .....	32
Figura 14 – Dimensões da aleta FNT057 .....	34
Figura 15 – Abertura para Instalação dos Módulos.....	34
Figura 16 – Adaptação Quadrado para Redondo.....	34
Figura 17 – Instalação das Aletas .....	35
Figura 18 – Isolamento com Lã Cerâmica.....	35
Figura 19 – Aplicação da Pasta Térmica Branca nos Módulos .....	36
Figura 20 – Ligação elétrica dos Módulos.....	36
Figura 21 – Representação das resistências térmicas.....	39
Figura 22 – Gradiente de temperatura [ $\Delta T$ ] vs Tensão produzida [V].....	42
Figura 23 – Gradiente de temperatura vs Potência.....	43



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de Termopares Comerciais.....	21
Tabela 2 - Especificações do Módulo Termoelétrico.....	30
Tabela 3 – Especificações do Módulo TEC1-12706.....	31
Tabela 4 – Características do Soprador Térmico Gamma Hg025br1.....	32
Tabela 5 – Resumo de valores obtidos.....	40
Tabela 6 – Resumo de valores do experimento.....	41
Tabela 7 – Resultados experimentais obtidos.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

$A_c$	Área
AC	Corrente Alternada
$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	Telureto de Bismuto
COP	Coefficiente de Performance
DC	Corrente Direta
$D_h$	Diâmetro Hidráulico
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ETEG	Gerador Termoelétrico Alimentado por Gases de Exaustão
$h$	Coefficiente convectivo
IAV	Companhia de Engenharia de Carros e Tráfego (Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr)
$k$	Coefficiente de Condutividade Térmica
MCI	Motor a Combustão Interna
NR	Norma Regulamentadora
$\eta_c$	Eficiência do Módulo
$N_u$	Número de Nusselt
$P$	Potência elétrica
Pr	Número de Prandtl
$Per$	Perímetro
$\dot{q}$	Taxa de Aquecimento
$-\dot{q}$	Taxa de Resfriamento
Re	Número de Reynolds
$T_\infty$	Temperatura do Fluido Frio
$T_c$	Temperatura Fria
$T_h$	Temperatura Quente
TEC	<i>Thermoelectric Cooler</i>
TEG	<i>Thermoelectric Generator</i>
$T$	Temperatura
$U_l$	Voltagem do Circuito
$v$	Velocidade
VCA	Voltagem Corrente Alternada
VDC	Voltagem Corrente Contínua

$Z_t$	Figura de Mérito
$\alpha$	Coeficiente de Seebeck
$\lambda'$	Condutividade Térmica
$\pi_{ab}$	Coeficiente de Peltier
$\Delta T$	Diferencial de Temperatura
$\Phi$	Eficiência do Gerador

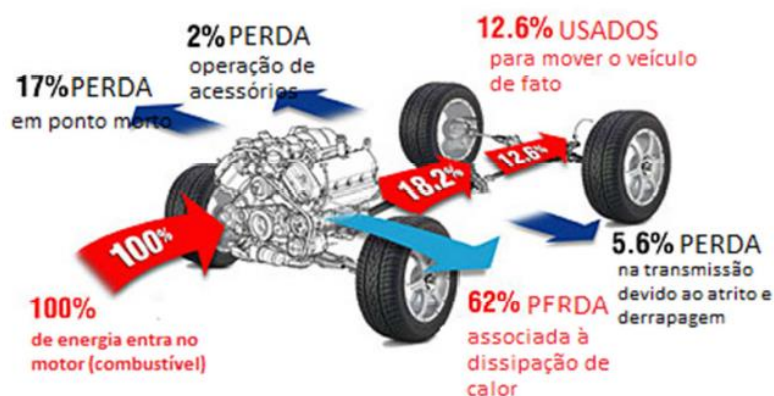
## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	14
1.2 OBJETIVOS GERAIS .....	14
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
2.1 EVOLUÇÃO DA TERMOELETRICIDADE .....	16
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>20</b>
3.1 EFEITOS TERMOELÉTRICOS .....	20
3.2 EFEITO SEEBECK .....	20
3.3 EFEITO PELTIER .....	22
3.4 FIGURA DE MÉRITO $Zt$ .....	22
3.5 MATERIAIS TERMOELÉTRICOS .....	26
3.6 MÓDULOS TERMOELÉTRICOS .....	26
3.7 SISTEMA ELETRICO AUTOMOBILISTICO .....	27
3.7.1 Bateria .....	28
3.7.2 Alternador .....	29
3.7.3 Motor de Arranque .....	29
3.8 ESCAPAMENTO AUTOMOTIVO .....	29
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>30</b>
4.1 ESPECIFICAÇÃO DO MÓDULO .....	30
4.2 FONTE DE CALOR .....	31
4.3 COSTRUÇÃO DO GERADOR .....	32
4.4 COLETA DOS DADOS .....	36
4.5 TESTE .....	37
<b>5 PROJETO DO MODELO PROPOSTO</b> .....	<b>38</b>
<b>6 RESULTADOS</b> .....	<b>41</b>
6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	43
<b>7 CONCLUSÃO</b> .....	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>46</b>
<b>APENDICE A: TABELA DE RESULTADOS NUMÉRICOS OBTIDOS NO EXPERIMENTO</b> .....	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a invenção dos carros com motores a combustão interna (MCI), a dependência por combustíveis fósseis vem crescendo cada vez mais. Com o aquecimento global e com os avanços tecnológicos, a busca por fontes alternativas para geração de energia é cada vez maior. Um dos grandes desafios do mundo atual é economizar energia e reduzir o consumo de combustíveis derivados do petróleo.

Nos veículos modernos cerca de 62% da energia produzida pela queima do combustível é perdida pelo motor através da dissipação de calor. Esse número é muito alto, o que torna os MCI muito ineficientes na conversão de energia química para energia mecânica. A Figura 1 mostra todas as perdas geradas num automóvel. Como apenas 12,6% energia gerada é usada para mover o veículo é possível aproveitar ou melhorar o consumo da mesma reaproveitando uma parte do que é perdido. (RAPOSO & MELO 2014)



**Figura 1 - Dissipação de energias de um MCI**  
 Fonte: HOLMBERG et al. (2012) *apud* RAPOSO & MELO (2014)

Na área de aproveitamento de energia, um campo muito promissor é a termoeletricidade. Geradores elétricos comuns utilizam algum tipo de combustível para a produção de energia, um gerador termoelétrico ao contrário, utiliza energia térmica que seria normalmente perdida em um sistema (motor a combustão interna, fornalha) como fonte.

Materiais termoelétricos começaram a ser estudados por volta do século XIX. Em 1821, Thomas Seebeck viu que certos materiais, quando submetidos a uma diferença de temperatura produzem um potencial elétrico, esse fenômeno passou a ser conhecido como Efeito Seebeck. O efeito contrário foi observado por Jean Charles

Athanase Peltier, em 1834, onde ao submeter uma junta formada por diferentes materiais condutores a um potencial elétrico, forma-se uma diferença de temperatura entre a junção, não relacionando o mesmo com o Efeito Seebeck. Vinte anos depois que Willian Thompson público um estudo relacionando os efeitos Seebeck e Peltier. (RAPOSO & MELO 2014)

Um gerador termoelétrico funciona com base no efeito Seebeck – Peltier, quando aplicado um diferencial de temperatura, o mesmo gera uma potência elétrica. Esse tipo de gerador é muito confiável por não ter partes móveis, mas tem como maior problema seu baixo coeficiente de performance (COP).

O maior problema encontrado no início das pesquisas sobre geradores termoelétricos foi a falta de estudos na área de materiais semicondutores. Alguns estudos recentes mostram um avanço no desenvolvimento desses materiais, utilizando elementos do grupo das terras raras (cério ou itérbio) adicionados na composição dos módulos termoelétricos. (NASCIMENTO *et al.* 2012)

A maior aplicação de materiais termoelétricos hoje em dia se dá em processos de refrigeração, utilizando placas de Peltier, transformando energia elétrica em energia térmica. Sendo utilizada em coolers de pequena escala, para pequenas adegas de vinho e até para transporte de órgãos a serem transplantados. Devido a sua grande durabilidade, precisão e pequeno espaço físico para funcionamento, o que implica em um baixo peso. (JUNIOR 2014). Módulos termoelétricos de geração de energia também podem ser aplicados em veículos de passageiros e carga, em instalações residenciais e prediais, em indústrias, na indústria aeroespacial, entre outras aplicações.

Por ser uma tecnologia recente e com poucas pesquisas o custo para implementação destes módulos ainda é alto, mas a pesquisa de novos materiais termoelétricos e o aumento da eficiência dos módulos os torna mais competitivos na busca por novas fontes de energia.

Esta pesquisa visa o desenvolvimento de um gerador termoelétrico de estado sólido (ETEG) para a captação de energia térmica gerada pelos gases de exaustão de um motor de combustão interna, a energia será armazenada em uma bateria para ser utilizada como apoio na alimentação elétrica do automóvel.

Desta forma, pode-se gerar um aumento da eficiência geral do veículo, reduzir o esforço do motor, o que implica num consumo menor de combustível, em uma menor poluição devido a quantidade de gases o que diminui o impacto ambiental .

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A relevância deste projeto se dá do fato que aproveitar uma energia que hoje em dia é considerada perdida, utilizando uma fonte de energia alternativa, dependendo apenas de perdas térmicas de sistemas. O objetivo não é acabar totalmente com os resíduos, mas sim aproveitar parte dele para geração de energia elétrica que influenciará num esforço menor do motor e conseqüentemente em uma economia de combustível.

Com a eminente falta de combustíveis fósseis, a busca por automóveis mais eficientes, vem crescendo. Desta forma, necessita-se ampliar a oferta de tecnologias que aumentem a eficiência no consumo de combustíveis atendendo a demanda por automóveis mais eficientes. O que faz com que toda e qualquer pesquisa que busque novas formas de aproveitamento da energia existente se torna relevante para o mercado de automóveis atual.

Um dos principais aspectos analisados na busca pela eficiência energética são as energias residuais perdidas no processo. O princípio da conservação de energia diz que a quantidade total de energia de um sistema isolado permanece constante, então como o aproveitamento de parte dessa energia perdida pode-se maximizar o rendimento do sistema.

Esse mesmo processo pode ser implementado em várias áreas da indústria para o aproveitamento de calores residuais.

## 1.2 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem como objetivo avaliar a implementação de um sistema ETEG com princípio de funcionamento baseado no efeito Seebeck, no auxílio da alimentação elétrica de um veículo.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Idealizar uma proposta de gerador termoelétrico;

- Analisar a viabilidade térmica de instalação do modelo proposto;
- Construir o gerador;
- Avaliar a produção elétrica do modelo.



## 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 EVOLUÇÃO DA TERMOELETRICIDADE

As primeiras pesquisas sobre termoeletricidade foram na área de refrigeração, utilizando o Efeito Peltier, o seu auge se deu nos anos 60, onde se acreditava que em pouco tempo todas as aplicações de refrigeração seriam substituídas por dispositivos que utilizavam este efeito. Como as pesquisas não conseguiram aumentar o coeficiente de desempenho dos dispositivos de arrefecimento termoelétrico, cerca de 4 a 5 vezes abaixo do coeficiente de sistemas de refrigeração por compressão de gás, logo as pesquisas se estagnaram. Atualmente os materiais termoelétricos tem grande utilização em processos de refrigeração. (RIFFAT & MA 2003)

As investigações têm tomado um rumo no sentido de encontrar novos materiais com elevado desempenho, voltando principalmente para nanoestruturas, ou então buscando a melhoria do desempenho de conversores termoelétricos convencionais, com o principal objetivo a refrigeração doméstica. (JUNIOR 2014)

Pesquisadores norte-americanos, liderados pelo Doutor Evgebii Levin, que compõem a equipe de terras raras, tem descobertos novos desempenhos em materiais termoelétricos existentes. Adicionando o equivalente a 1% de cério ou itérbio ao composto  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , com isso obteve-se um aumento de desempenho de até 25% nos módulos termoelétricos. (NASCIMENTO *et al.* 2012)

Esses estudos ainda não conseguem explicar como esse resultado é obtido, mas teorizam que a quantidade mínima de elementos aplicados consegue afetar a estrutura cristalina da liga. O Doutor Evgenii afirma que quando for descoberto a real causa desse melhoramento, o rendimento poderá ser otimizado, ou então, procurar novos elementos ou compostos capazes de aumentar ainda mais os efeitos termoelétricos. (NASCIMENTO *et al.* 2012)

Hoje é possível encontrar com certa facilidade comercialmente produtos que utilizam o efeito Peltier, como bebedouros, adegas, caixas de transporte de órgãos,

refrigeradores farmacêuticos portáteis, entre outros. (JUNIOR 2014). Mas a utilização de módulos termoelétricos voltados a refrigeração está limitada, pela sua viabilidade técnica e econômica. (NASCIMENTO *et al.* 2012)

A utilização de módulos termoelétricos tem como vantagens, sua alta durabilidade, volume reduzido e grande precisão, e por ser tratar de uma energia residual pode ser classificado como uma cogeração de energia limpa. (ISMAIL & AHMED 2009)

Na área automotiva, o primeiro gerador que utiliza a energia desperdiçada pelo escapamento foi construído e publicado por Neild em 1963. (NEILD 1963 *apud* MARTINS *et al.* 2011) .Mas as pesquisas tiveram seu maior desenvolvimento a partir dos anos 80, quando com o desenvolvimento de novos materiais semicondutores, a viabilidade da implementação de ETEG's aumentou, mas mesmo assim suas eficiências globais se mantiveram com valores baixos. (SAQR *et al.* 2008)

Em 1987, a empresa *Hi-Z Technology* criou um programa com o objetivo de criar um gerador termoelétrico capaz de gerar 200W através da conversão de calor, sendo o mesmo publicado em 1991. Como continuação deste projeto, o objetivo foi ampliado para gerar 1kW, o gerador foi implementado para testes em um caminhão em 1993, no início foi obtido 400W, mas que após otimizações foram alcançados 1068W. (MARTINS *et al.* 2011 *apud* JUNIOR 2014)

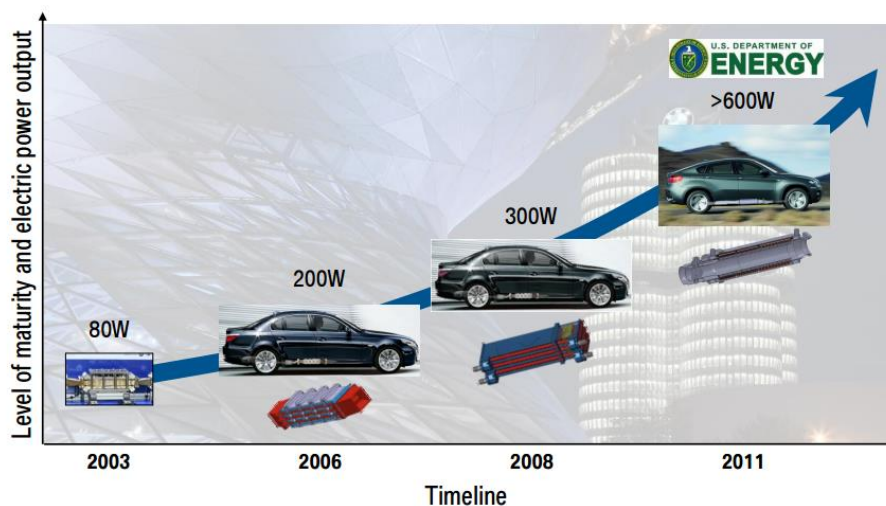
Alguns anos depois o mesmo gerador usado na pesquisa foi modificado e utilizado em um veículo utilitário esportivo híbrido capaz de gerar 180W. Mais tarde A *Hi-Z Technology* começou estudos para testar um gerador capaz de produzir 300W, com um sistema para carregar baterias de 12 e 24V, os resultados foram apresentados em 2004 obtendo 150W de potência. (MARTINS *et al.* 2011)

As grandes empresas automotivas também estão pesquisando nesta área. A Volkswagen e a *Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr* (IAV) tem como objetivo implementar em um Volkswagen Golf, um gerador capaz de alimentar todos os dispositivos elétricos do automóvel. Outra grande empresa a se arriscar com pesquisas nesta área é a Honda. (MARTINS *et al.* 2011 *apud* JUNIOR 2014)

A empresa BMW vem pesquisando nesta área desde 2003, onde conseguiram obter 80W através de um gerador, e chegando em 2011 ao modelo X6 capaz de gerar mais de 600W, como pode ser visto na figura 2. (EDER & LINDE 2011)

A Figura 2 mostra os resultados obtidos pelo modelo da BMW X6 TEG Protótipo, onde em uma velocidade média de 100 km/h foi obtido um resultado

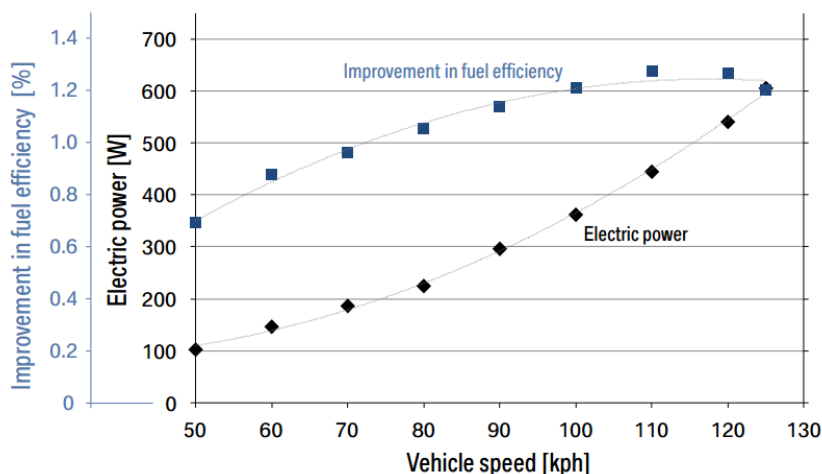
aproximado de 350W de energia elétrica uma melhora no consumo de combustível de cerca 0,7%. Resultados estes obtidos em um funcionamento estável do carro a esta velocidade.



**Figura 2 - Evolução da potência obtida pela BMW.**  
**Fonte: EDER & LINDE (2011)**

Pesquisadores apontam que alguns riscos técnicos e comerciais ainda precisam ser superados, como o aumento na procura de materiais termoelétricos, o processo de montagem, a integração do sistema (o peso extra no escapamento, a capacidade máxima de resfriamento, entre outros), e a durabilidade do sistema. Ainda apontam que a chave para uma entrada com sucesso no mercado cai na redução dos custos para produção, na escolha certa para o material termoelétrico, um sistema de montagem simples e de fácil aplicação, e a obtenção de uma potência alta a temperaturas médias. (MAZAR 2012)

O Figura 3 exemplifica a relação entre a velocidade do veículo com a potência obtida pelo gerador juntamente do consumo de combustível momentâneo. Podemos ver que quanto maior a velocidade do automóvel maior a produção de energia do gerador, e conseqüentemente um aumento na eficiência de consumo de combustível. Esse aumento se dá pela velocidade estar diretamente ligada a rotação do motor, e quanto maior a rotação maior o fluxo de gases e maior a transferência de calor para o gerador.



**Figura 3 - Relação entre a velocidade do veículo x potência obtida x consumo de combustível.**  
**FONTE: MAZAR (2012)**

SAQR *et al.* (2012) realizou um estudo buscando a economia de combustível em motores a combustão utilizando ETEG's. Foi utilizado dois tipos de motores, um motor de um veículo utilitário e um motor estacionário. Foi obtido economias de 0,4% para o motor do veículo e cerca de 3% para o motor estacionário, utilizando módulos termoelétricos de Telureto de Bismuto.

Combinando a recuperação de calor do escapamento junto com as perdas no sistema de refrigeração do motor, pode-se obter uma eficiência de produção de energia elétrica de cerca de 6%, sendo 1% do sistema de refrigeração e 5% do escapamento. (FAIRBANKS 2008)

SAQR *et al.* (2012) lista que os quatro principais fatores que controlam a eficiência térmica de um ETEG são:

- O material do trocador de calor;
- O sistema de arrefecimento do ETEG;
- O local de instalação do ETEG;
- A geometria do trocador de calor;

### 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 e uma descrição do sistema elétrico atual de um automóvel.

#### 3.1 EFEITOS TERMOELÉTRICOS

Pode-se demonstrar os efeitos termoelétricos utilizando um termopar seguindo o modelo mostrado na Figura 4 abaixo, onde dois metais semicondutores **a** e **b** são ligados termicamente em paralelo e eletricamente em série. Um termopar quando estimulado por uma energia externa, comumente uma variação de temperatura, produz ele próprio um sinal analógico de corrente ou tensão.

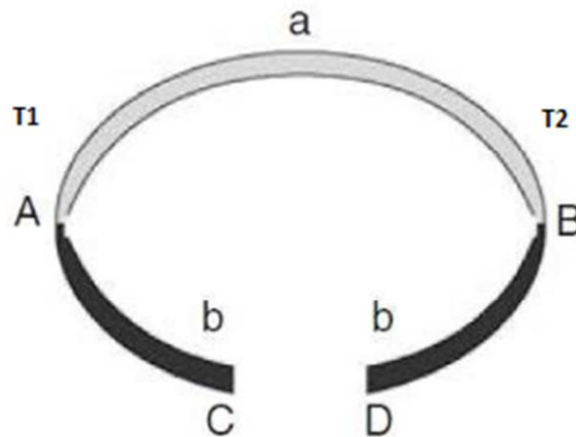


Figura 4 – Modelo de Termopar  
Fonte: ROWE (2005)

#### 3.2 EFEITO SEEBECK

Para descrever o Efeito Seebeck pode-se utilizar como base o termopar apresentado na Figura 4. Quando se submete às junções A e B a temperaturas diferentes sendo  $T_1 > T_2$ , uma força eletromotriz  $U$  é gerada, a mesma se desenvolve entre os terminais C e D do termopar e segue a equação 2.1:

$$U = \alpha_{ab}(T_1 - T_2) \quad (2.1)$$

Onde:

$$\alpha_{ab} = \alpha_a - \alpha_b \quad (2.2)$$

Sendo  $\alpha$  o coeficiente de Seebeck, que em alguns casos também pode ser representado pela letra S.

A direção da força eletromotriz gerada pelo termopar induz a corrente e essa é a responsável pelo sinal de  $\alpha$ . Quando a corrente segue no sentido horário o sinal é positivo e negativo quando no sentido anti-horário. Usualmente o coeficiente é medido em  $\mu$  V/K.

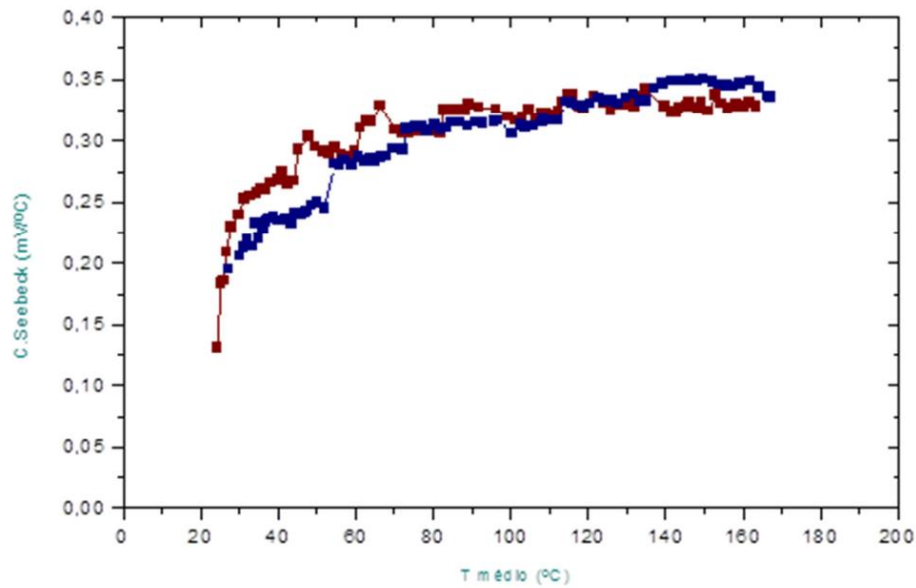
Termopares baseados no efeito Seebeck são usados para medições em uma ampla faixa de temperaturas. Uma de suas junções é colocada onde a temperatura se deseja determinar e outra é mantida a uma temperatura constante, usualmente a temperatura utilizada é o ponto de fusão do gelo. Tendo em mãos o valor do coeficiente de Seebeck do termopar, a temperatura pode ser obtida através da força eletromotriz gerada. A Tabela 1 mostra alguns dos coeficientes Seebeck de termopares comerciais a 20°C. (RAPOSO & MELO 2014)

**Tabela 1 – Coeficientes de Termopares Comerciais**

Tipo do Termopar (Comercial)	Metais da Junção	Coeficiente Seebeck a 20°C [ $\mu$ V/°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: RAPOSO & MELO (2014)**

Estudos foram realizados para a obtenção da variação do coeficiente de Seebeck conforme mudança de temperatura utilizando materiais a base de Si-Ge. A Figura 5 exemplifica duas medidas realizadas consecutivas mostrando a variação do coeficiente, onde cada cor representa uma medida. (Couto *et al.* 2010)



**Figura 5 – Valores de variação do coeficiente de Seebeck em relação a temperatura**  
**FONTE: COUTO *et al.* (2010)**

### 3.3 EFEITO PELTIER

O efeito Peltier se dá contrário do efeito Seebeck, ou seja, quando uma força eletromotriz é aplicada sobre os terminais C e D do termopar (Figura 4), gerando uma corrente  $[I]$ , a mesma produz uma taxa de aquecimento  $[\dot{q}]$  em uma das junções e uma taxa de resfriamento  $[-\dot{q}]$  na outra. Pode-se definir o coeficiente de Peltier  $[\pi_{ab}]$  como a relação entre  $[I]$  e  $[\dot{q}]$ , descrito pela equação 2.3.

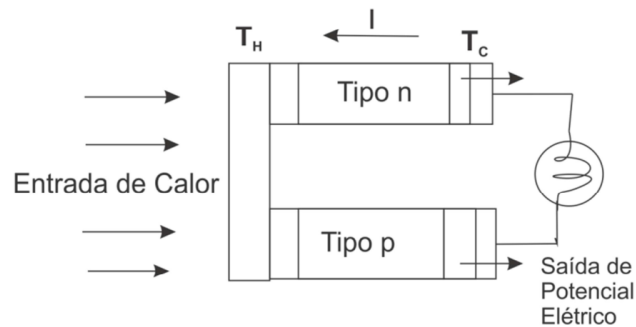
$$\pi_{ab} = \frac{I}{\dot{q}} \quad (2.3)$$

A unidade de medida do coeficiente de Peltier é dada em Watts por Ampère [W/A] ou Volts [V].

### 3.4 FIGURA DE MÉRITO $Z_t$

O gerador termoelétrico está sujeito às leis termodinâmicas como qualquer máquina térmica, ao considerando um gerador ideal, onde nenhuma perda de calor

existe, pode-se definir a eficiência como a taxa entre a potência elétrica gerada e o calor absorvido pela junção quente. Para derivar as equações que regem os parâmetros utiliza-se o tipo mais simples de gerador, que consiste em um termopar de um estágio, formado por materiais do tipo n (negativo) e do tipo p (positivo), Figura 6.



**Figura 6 - Gerador termoelétrico composto por um termopar de um estágio.**  
**FONTE: ROWE (2005)**

A eficiência do gerador é dada pela equação 2.4:

$$\Phi = \frac{\text{Energia Gerada}}{\text{Calor Transferido pela Junção Quente}} \quad (2.4)$$

Assumindo que as condutividades térmicas, elétricas e o coeficiente Seebeck são constantes ao longo do termopar, desprezando as resistências de contato entre as junções e comparando à soma de resistência do termopar, a eficiência pode ser expressa então pela equação 2.5:

$$\Phi = \frac{I^2 R}{\alpha_{ab} I T_h + \lambda' (T_h - T_c) - \frac{1}{2} I^2 R} \quad (2.5)$$

Onde R é a resistência em série de a e b (Figura 4) e  $\lambda'$  é a condutividade térmica de a e b em paralelo. Para materiais termoelétricos R,  $\lambda'$  e  $\alpha$  mudam conforme a temperatura e essa variação deve ser levada em conta. Porém a equação simplificada por ser aplicada com um grau aceitável de precisão caso adotados valores médios para os parâmetros ao longo da faixa de operação do sistema (ROWE, 2005 *apud* RAPOSO & MELO 2014).

A eficiência máxima na geração é dada pela equação 2.6 a 2.9:



$$\Phi_{max} = \eta_c \gamma \quad (2.6)$$

onde,

$$\eta_c = \frac{T_h - T_c}{T_h} \quad (2.7)$$

e,

$$\gamma = \frac{\sqrt{1 + Z_c \bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z_c \bar{T}} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (2.8)$$

e,

$$\bar{T} = \frac{T_h - T_c}{2} \quad (2.9)$$

Simplificando tem-se:

$$\phi = \frac{T_h - T_c}{\frac{3T_h}{2} + \frac{T_c}{2} + \frac{4}{Z_t}} \quad (2.10)$$

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

Pode-se definir a Figura de Mérito como a medida da capacidade dos materiais termoelétricos na transformação de energia térmica em energia elétrica (RAPOSO & MELO 2014), sendo que a equação 2.11 descreve a relação, a unidade de medida é  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

$$Z_T = \frac{\alpha_{ab}^2}{R\lambda'} \quad (2.11)$$

Tendo as geometrias de a e b projetadas para minimizar a absorção de calor, a Figura de Mérito é dada então pela equação 2.12:

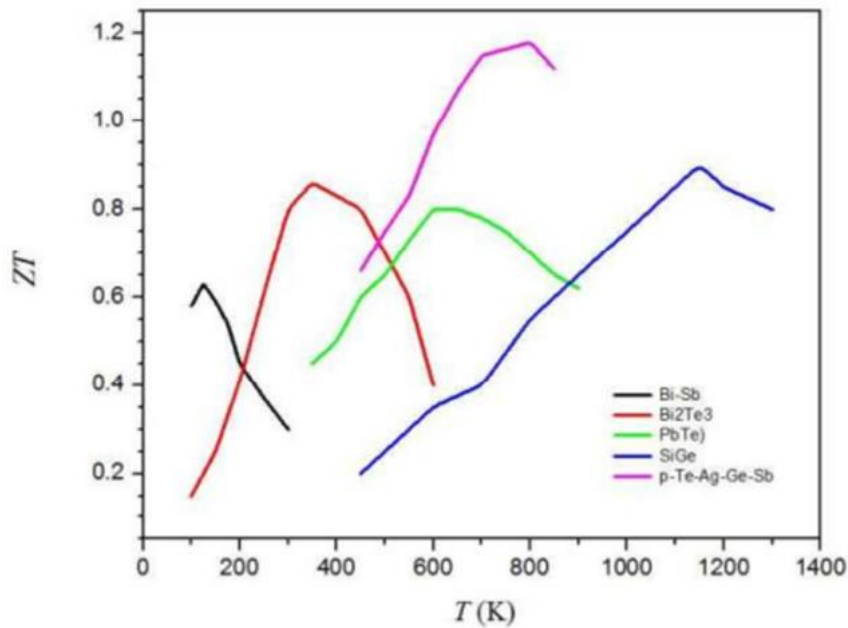
$$Z_T = \frac{\alpha_{ab}^2}{\left[ \left( \frac{\lambda_a}{\sigma_a} \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{\lambda_b}{\sigma_b} \right)^{\frac{1}{2}} \right]} \quad (2.12)$$

Na prática, devido as junções de termopares possuírem materiais com constantes similares a equação que descreve a figura de mérito pode ser simplificada chegando-se a equação 2.13.

$$Z_T = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} \quad (2.13)$$

Todas as relações são derivadas considerando que os parâmetros que agem na Figura de Mérito  $Z_T$  são independentes da temperatura, mas que na prática é difícil de acontecer, se assumir um valor médio pode-se obter valores próximos do valor real, com uma margem de erro de cerca de 10% (ROWE, 2005).

A Figura 7 mostra a relação da figura de mérito com a temperatura de algumas ligas.



**Figura 7 – Figura de Mérito vs Temperatura**  
**FONTE: FERNANDES (2012)**

### 3.5 MATERIAIS TERMOELÉTRICOS

Pode-se dividir os materiais considerando a sua condutividade elétrica, os mesmos podem possuir uma alta condutividade elétrica, como os metais, ou uma baixa condutividade, caso dos materiais isolantes (pode-se considerar que materiais isolantes possuem condutividade zero em condições normais), os semicondutores são intermediários entre os metais e isolantes.

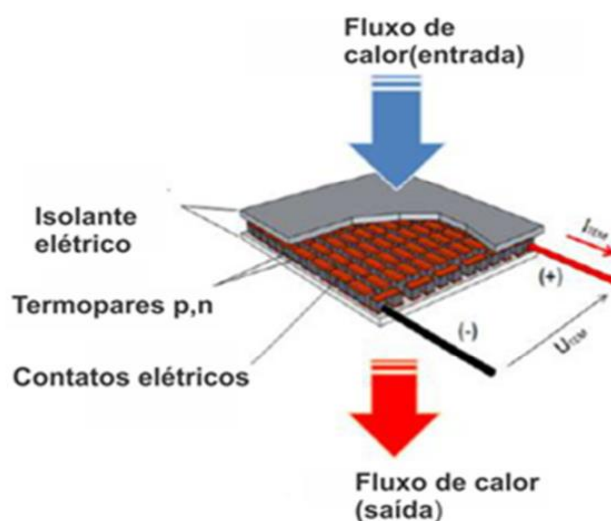
A condutividade elétrica é um reflexo da concentração de cargas livres, a condutividade aumenta com o aumento do número de cargas livres, e o coeficiente de Seebeck diminui. (RAPOSO & MELO, 2014)

### 3.6 MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

Os termopares simples possuem uma tensão de saída muito baixa, microvolts por grau Celsius, para aplicações práticas que necessitam de valores relativamente maiores, é necessário conectar um grande número de termopares eletricamente em série e termicamente em paralelo, fazendo um “sanduiche” dos termopares entre duas placas cerâmicas de alta condutividade, pode-se visualizar o módulo na Figura 8.

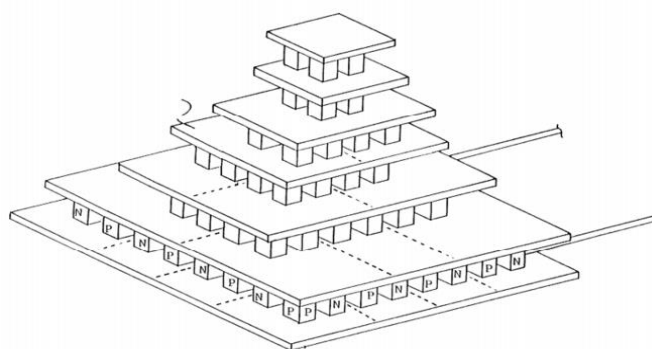
Para a construção de módulos deve-se considerar a sua geometria ideal, para módulos de geração de energia os termoelementos devem ser compridos e finos, e curtos e grossos para refrigeração. Quanto ao tamanho, os módulos podem variar de 1,5 mm<sup>2</sup> até 50 mm<sup>2</sup>. A equação 2.14 mostra a maior diferença de temperatura de um módulo de estágio único em aplicações de refrigerações.

$$\Delta T_{max} = \frac{1}{2} Z_T^2 \quad (3.1)$$



**Figura 8 – Módulo termoelétrico**  
**FONTE: ROWE (2005)**

Para aumentar a diferença de temperatura pode-se optar por módulos montados em cascata, ou seja, de forma que o lado quente de um estágio seja resfriado pelo lado frio de outro. Esse tipo de módulo apresenta formato piramidal, devido a necessidade de refrigeração de cada estágio do módulo ser diferente, pode-se visualizar o módulo na Figura 9.



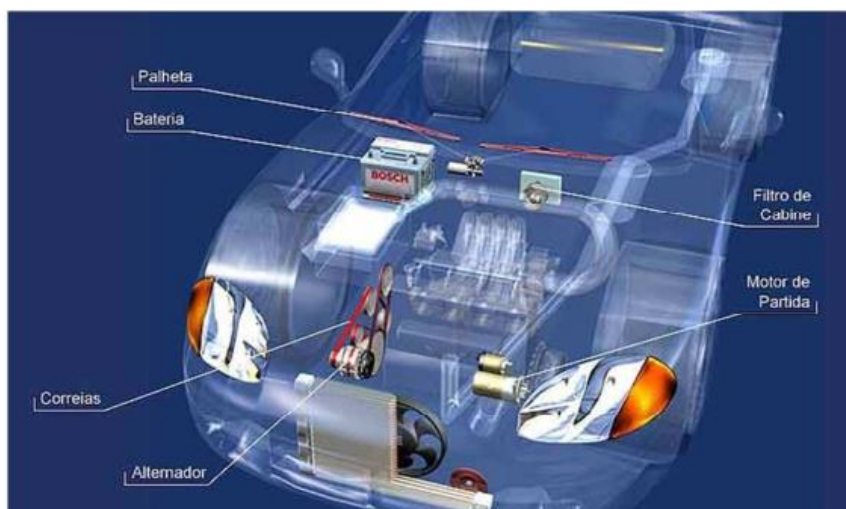
**Figura 9 – Módulo termoelétrico em cascata**  
**FONTE: ROWE (2005),**

### 3.7 SISTEMA ELETRICO AUTOMOBILISTICO

O sistema elétrico de um automóvel está dividido em circuitos, cada circuito com sua função e comando, dentre eles são: o circuito de carga na bateria, circuito de ignição, circuito de arranque, circuito de luzes e acessórios, sendo controlados pela chave de ignição e protegidos por fusíveis.

A alimentação desses sistemas vem de duas fontes, o alternador, que utiliza a energia mecânica gerada pelo motor e a transforma em energia elétrica, e a bateria, que armazena energia e é utilizada para a partida do motor.

A Figura 10 mostra um esquema simplificado de representação do sistema elétrico do veículo.



**Figura 10 – Esquema elétrico de um veículo**  
**FONTE: Chaveiro Tech (2014)**

### 3.7.1 Bateria

Nos automóveis atuais é mais comum encontrar baterias compostas de acumuladores de chumbo-ácido, as mesmas possuem um ciclo de vida de 3 a 5 anos, e devido ao preço tem um bom custo benefício.

Esse tipo de bateria é capaz de utilizar energia química e transforma-la em energia elétrica, essas baterias consistem em placas de chumbo imersas em uma solução eletrolítica. Para a aplicação automotiva são ligadas seis baterias de 2,1 Volts em série formando uma de 12 Volts, tensão utilizada pelos automóveis.

Baterias de chumbo-ácido são denominadas baterias de armazenamento, ou seja, as mesmas não geram energia por conta própria, elas armazenam energia provida de outras fontes, a capacidade de carga da bateria é determinada pelo tamanho das placas e a quantidade de eletrólito que a mesma possui.

Comercialmente os principais pontos de interesse nas baterias são: a tensão nominal [V], sendo a soma das voltagens produzidas em todas as células da bateria, a capacidade [A/h], sendo a quantidade de corrente que a bateria fornece por hora e

a corrente de partida [A], a corrente máxima que a mesma consegue fornecer sem ocorrer uma queda de tensão. (Chaveiro Tech 2014)

### 3.7.2 Alternador

O alternador é uma máquina mecânica, é ligada ao motor por uma correia e alimentada por parte da potência do mesmo. O alternador transforma o movimento rotacional produzido pelo motor em energia elétrica. Consiste de: estator, rotor, placa retificadora, regulador de tensão e rolamentos.

Os alternadores encontrados no mercado atual são usualmente de 85 A a 12,6 V e geram aproximadamente 1000 W. (Chaveiro Tech 2014)

### 3.7.3 Motor de Arranque

O motor de arranque ou motor de partida, é um motor elétrico alimentado pela bateria do automóvel, ligado diretamente ao eixo virabrequim do motor, tem a finalidade de girar o motor a combustão interna quando o mesmo está parado até que a combustão seja capaz de mover o motor, é acionado pela chave de ignição e só permanece ligado durante a partida do motor. (Chaveiro Tech 2014)

## 3.8 ESCAPAMENTO AUTOMOTIVO

O conjunto de escapamento do veículo é formado por tubos e abafadores com o objetivo de levar os gases provenientes da queima do combustível para fora do motor.

As dimensões e especificações de cada escapamento são definidas pela montadora, levando em consideração o projeto do carro que o mesmo irá ser instalado.

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

## 4 METODOLOGIA

Os projetos estudados são relativos a utilização de módulos termoelétricos em geral e projetos de engenharia para construção de geradores termoelétricos voltados para a aplicação veicular. Com a revisão bibliográfica feita, é possível realizar uma proposta conceitual de um gerador para a aplicação desejada.

### 4.1 ESPECIFICAÇÃO DO MÓDULO

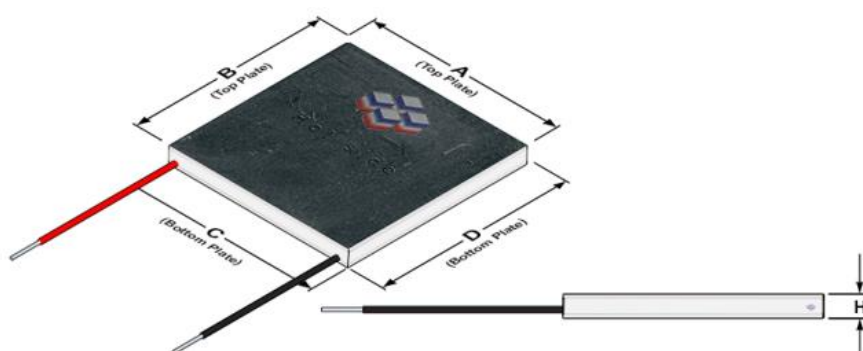
A escolha dos módulos termoelétricos é feita com base na disponibilidade comercial, sua construção, sua capacidade de geração de energia, faixa de temperatura de trabalho, eficiência. Os módulos deverão ter uma potência capaz de auxiliar parte elétrica de um veículo.

Atualmente existem disponíveis no mercado internacional módulos de termopares produzidos especificamente para a geração de energia, para a escolha de um módulo ideal foi realizada uma pesquisa no catálogo da empresa *Custom Thermoelectric*. Foi selecionado o seguinte módulo: 1261G-7L31-04CQ *Power Generation Module* (Figura 11). Tendo as especificações mostradas na **Error! Reference source not found..**

**Tabela 2 - Especificações do Módulo Termoelétrico**

Descrição	Valor
Temperatura máxima do lado quente [°C]	320
Temperatura máxima do lado frio [°C]	180
Temperatura assumida do lado quente [°C]	300
Temperatura assumida do lado frio [°C]	30
Voltagem [V]	4,8
Resistência [ $\Omega$ ] @ 27°C	1,7
Potência de Saída [W]	7,5
Corrente de Saída [A]	1,56
Condutividade Térmica [W/m.K]	1,2
Peso [g]	25

Fonte: TEG Specification Sheet (2014)



**Figura 11 - Dimensões do Módulo Termoelétrico**  
**Fonte: TEG Specification Sheet (2014)**

Analisando as características dos módulos disponíveis, o primeiro critério é que o mesmo suporte altas temperaturas, foi analisado a potência máxima de saída dos mesmos, e escolhido o que oferecesse o melhor custo benefício, temperatura máxima de trabalho x potência de saída x preço. Melhorando assim a possível implantação do gerador. Devido a disponibilidade de mercado nacional e facilidade de compra foi optado pela compra de um módulo de Peltier modelo TEC1-12706 adquirida pela internet que apresenta as características na Tabela 3:

**Tabela 3 – Especificações do Módulo TEC1-12706**

Descrição	Valor
Temperatura máxima do lado quente [°C]	70
Temperatura máxima do lado frio [°C]	-30
Voltagem [VDC]	0 à 15,2
Potência de Saída [W]	60
Corrente de Saída [A]	0 à 6
Resistência Interna [ $\Omega$ ]	2,5

**FONTE: TEC Data Sheet (2016)**

## 4.2 FONTE DE CALOR

O intuito de aplicação desse gerador é ser implantado em um escapamento automotivo. Para replicar os gases de exaustão foi utilizado então um soprador térmico da marca Gamma Hg025br1 (Figura 12) com características mostradas na Tabela 4, montado diretamente no duto do gerador. Para simular o vento do lado externo do escapamento primeiramente foi utilizado um ventilador, mas o mesmo não proporcionava uma velocidade grande o suficiente para a refrigeração requisitada,



como outra opção foi utilizado um secador de cabelo, que proporcionou um fluxo mais uniforme e com maior velocidade.

**Tabela 4 – Características do Soprador Térmico Gamma Hg025br1**

Descrição	Valor
Temperatura máxima [°C]	500
Temperatura mínima [°C]	300
Potência [W]	1500
Voltagem [VCA]	127
Regulagem de Potência	2
Frequência [Hz]	60

**FONTE: Manual de Instruções do Produto (2016)**



**Figura 12 – Soprador Térmico Gamma Hg025br1**  
**FONTE: Manual de Instruções do Produto (2016)**

#### 4.3 COSTRUÇÃO DO GERADOR

Foi necessário para a fabricação do gerador os seguintes itens:

- Dois módulos Peltier modelo TEC1-12706;
- Duas aletas modelo FNT 057;
- Pasta Térmica;

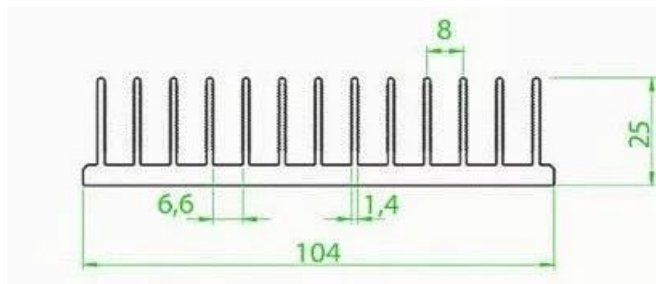
- Parafusos para fixação das aletas;
- Tubo de seção quadrada;
- Soprador Térmico;
- Silicone de alta temperatura;
- Ferramentas em geral (esquadro, serras, instrumentos de medição);
- Fibra cerâmica;

Para aumentar a taxa de transferência de calor entre superfícies, tem-se a disposição duas formas, o coeficiente convectivo  $[h]$  pode ser aumentado através da elevação da velocidade do fluido e/ou a temperatura do fluido frio  $[T^\infty]$  pode ser reduzida. Mas em algumas situações o aumento de  $[h]$  até o a valor máximo não é suficiente para obter a taxa de transferência desejada. A outra opção é aumentar a área da superfície através da qual ocorre a convecção. Isso é efetuado empregando aletas que se estendem da parede para o interior do fluido. (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. Aletas podem ser do tipo: parede plana, aleta anular, aleta piniforme ou pino. Em qualquer aplicação a seleção deve depender do espaço, peso, fabricação e custo e levando em consideração a extensão na qual as aletas reduzem o coeficiente convectivo na superfície e aumentam a queda de pressão. (INCROPERA *et al.* 2008)

Para a aplicação no gerador selecionou-se entre as aletas comerciais disponíveis no mercado, conhecidas como dissipadores de calor. Analisando de forma a escolher a que apresentasse uma geometria compatível com o módulo utilizado, e que possuía uma baixa resistência térmica, de forma a aumentar o fluxo de calor através do sistema.

A aleta escolhida é do modelo FNT057 com resistência térmica de  $1,79^\circ\text{C/W}$  para um comprimento de 4", com suas dimensões mostradas na Figura 13.



**Figura 13 – Dimensões da aleta FNT057**  
**FONTE: RELAÇÃO DE PEÇAS FENITE (2016)**

Para a construção do gerador utilizou-se um tubo de seção quadrada e 80mm x 80mm, e fabricado um adaptador para circular  $\varnothing 32$ mm em uma extremidade (Figura 15), foi realizado então uma abertura do tamanho de cada módulo para a sua instalação (Figura 14).

Para aumentar a área de convecção foi instalado aletas tanto na parede interna como externa do tubo (Figura 16), e então isolado com fibra cerâmica todas as paredes com exceção da parede onde foram instalados os módulos e fixados com arrames e fitas “zip tie”, como mostrado na Figura 17.



**Figura 14 – Abertura para Instalação dos Módulos**  
**FONTE: Autoria Própria**



**Figura 15 – Adaptação Quadrado para Redondo**  
**FONTE: Autoria própria**

O tubo quadrado utilizado foi obtido de sucatas disponibilizadas pelo laboratório de usinagem da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e cortado na medida utilizando uma serra fita de bancada.

Para a fabricação da redução quadrado para redondo foi traçado no tubo as retas de corte e cortado utilizando uma esmerilhadora com disco de corte de 7" e com o auxílio de uma serra manual, para a dobra da chapa, internamente no tubo foi apoiado com chapas e dobrado utilizando um martelo, devido ao material ser de espessura fina que torna a soldagem mais difícil, foi optado por vedar apenas com silicone de alta temperatura. (Figura 15)



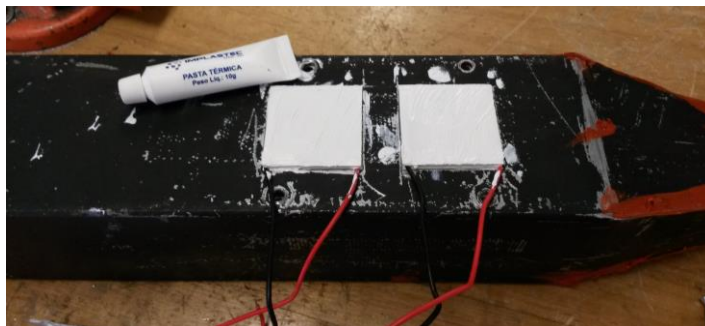
**Figura 16 – Instalação das Aletas**  
FONTE: Autoria própria



**Figura 17 – Isolamento com Lã Cerâmica**  
FONTE: Autoria própria

A fixação das aletas foi realizada com parafusos e porcas, travando a aleta interna com a externa deixando o módulo entre as mesmas, para melhor transferência de calor entre as aletas e a parede do módulo foi utilizado pasta térmica (Figura 18).

Para obter uma maior tensão resultante com a transferência de calor, como os 2 módulos estão termicamente em paralelo, eletricamente precisam ser conectados em série (Figura 19).



**Figura 18 – Aplicação da Pasta Térmica Branca nos Módulos**  
**FONTE: Autoria Própria**



**Figura 19 – Ligação elétrica dos Módulos**  
**FONTE: Autoria própria**

#### 4.4 COLETA DOS DADOS

Para a medição de voltagem foi optado pela utilização de um multímetro disponibilizado pela Universidade, e para a medição de temperatura foi utilizado um termômetro digital infravermelho da marca Minipa, modelo MT-320 com uma faixa de medição de 20°C a 400° C. Os dados foram contabilizados manualmente e apresentados no capítulo seguinte.

Pela falta de um sistema automatizado para a obtenção dos dados, foi posicionado uma câmera gravando todos os instrumentos de medição, podendo assim posteriormente analisar e computar os dados para uma tabela.

Para ser possível a medição da corrente do circuito, se faz necessário a inserção de uma resistência em paralelo no sistema, para maximizar a produção de energia essa resistência deve ser igual a resistência interna da placa, neste caso como

cada módulo possui  $2,5 \Omega$  e estão ligados em série, foi utilizado um resistor cerâmico de  $5 \Omega$ . Essa resistência se faz necessária para o cálculo da corrente do sistema, e utiliza a lei de Ohm como base de seu funcionamento, o cálculo será apresentado a seguir.

#### 4.5 TESTE

O experimento foi montado em uma bancada, realizado todas as conexões elétricas e realizado testes individuais de cada componente para garantir o seu funcionamento.

Para a realização do teste todos os equipamentos foram ligados no mesmo momento e a partir disto foi iniciado a contabilização dos dados.

A vazão dos gases não pode ser calculada efetivamente, para considerações podemos usar a vazão tabelada fornecida pelo fabricante dos equipamentos.

O experimento decorreu do momento da ligação dos equipamentos até o momento em que a temperatura ultrapassou  $138^{\circ}\text{C}$  sendo o limite de segurança dos módulos, onde os equipamentos foram desligados e a contabilização dos dados foi finalizada.

Para o cálculo da corrente que passa pelo sistema, utiliza-se a equação 5.1 abaixo, onde  $U_l$  corresponde a voltagem do circuito (saída do TEG) medida em Volts,  $R$  corresponde a resistência introduzida no sistema (neste caso  $5\Omega$ ), e  $I$  é a corrente elétrica [A] que desejamos encontrar, que será para fins de cálculo considerada para os 2 módulos.

$$U_l = R \cdot I \quad (5.1)$$

Através dos valores obtidos da tensão e corrente, pode-se finalmente calcular a potência elétrica desenvolvida pelo gerador, através da equação 5.2 abaixo:

$$P = U_l \cdot I \quad (5.2)$$

## 5 PROJETO DO MODELO PROPOSTO

Para determinar o coeficiente de convecção  $h$  do escoamento dos gases, precisa-se primeiro definir o diâmetro hidráulico da seção quadrada  $D_h$ , o mesmo pode ser calculado pela equação 4.1:

$$D_h = \frac{4A_c}{Per} \quad (4.1)$$

A partir do diâmetro hidráulico é possível obter o número de Nusselt para uma seção quadrada quando o fluxo de calor é constante (INCROPERA et al. 2008):

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (4.2)$$

Ainda necessita-se obter o valor de  $k$  (coeficiente de condutividade térmica) para o cálculo do coeficiente de convecção  $h$ . Para simplificação, considera-se o escoamento dentro do tubo sendo de ar a pressão atmosférica e sendo um escoamento termicamente desenvolvido ( $h$  é constante), podendo utilizar o valor tabelado de  $k$  (INCROPERA et al. 2008). Considerando uma temperatura média do gás dentro do tubo de 300°C (573,15 K), tem-se  $k$  como 0,045 W/m.K. Sendo a seção transversal interna do tubo de 76 x 76 mm tem-se um valor para o coeficiente de convecção dentro do tubo  $h_{int}$  utilizando a equação 4.2, de 2,1375 W/m².K.

Esse valor encontrado se refere a um escoamento laminar, mas sabe-se que a exaustão dos gases é turbulenta, para corrigir esse valor utiliza-se a equação 4.3 (INCROPERA et al. 2008), a mesma depende dos números de Reynolds ( $Re$ ) e de Prandtl ( $Pr$ ) ambos tabelados a 300°C e à pressão atmosférica, tendo Prandtl como 0,6839 e para  $Re$  no escoamento interno do tubo temos o valor calculado por Martins (2006) de ordem 15000.

$$\overline{Nu} = 0,0214 \left( Re^{4/5} - 100 \right) Pr^{2/5} \left[ 1 + \left( \frac{D_h}{L} \right)^{2/3} \right] \quad (4.3)$$

O valor corrigido de acordo com a equação 4.3, usando  $L = 400 \text{ mm}$ , e  $\overline{Nu}$  como 51,1706 pela equação 4.2  $h_{int}$  é 30,2984 W/m<sup>2</sup>.K.

Para calcular o coeficiente convectivo do ar  $h_{ext}$  considera-se que a temperatura média anual da cidade de Guarapuava é de 16,8°C, segundo informações fornecidas pela prefeitura municipal, utilizando como base a temperatura ambiente de 20°C. Empregando a equação 4.4 sendo  $v$  a velocidade relativa do carro em relação ao ar, em m/s (INCROPERA et al. 2008), tem-se:

$$h_{ext} = 10,45 - v + 10v^{\frac{1}{2}} \quad (4.4)$$

Considerando que a velocidade do carro seja 60 km/h (16,67 m/s), tem-se então que o coeficiente convectivo  $h_{ext}$  é 34,6089 W/m<sup>2</sup>.K. Para o módulo termoelétrico, o coeficiente condutivo  $k$ , foi informado pelo fabricante como 2,1 W/m.K.

A partir destes valores pode-se calcular a resistência térmica equivalente do sistema, o fluxo de calor que passa o módulo e então determinar as temperaturas do lado quente e frio do módulo.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos valores encontrados acima para facilidade de visualização.

A transferência de calor do sistema pode ser dividida em três partes, representadas na Figura 20:

- Convecção entre os gases que escoam dentro do escapamento e o lado quente do módulo;
- Condução entre os lados quente e frio do módulo;
- Convecção entre o lado frio do módulo e o ar externo;



**Figura 20 – Representação das resistências térmicas**  
**FONTE: RAPOSO & MELO (2014)**



Tabela 5 – Resumo de valores obtidos

Descrição	Valor
Temperatura dos gases [K]	573,15
Temperatura do ar [K]	293,15
Coeficiente Convectivo Gases $h_{int}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	30,2984
Coeficiente Convectivo Ar $h_{ext}$ [W/m <sup>2</sup> .K]	34,6089
Resistência Térmica Aleta [°C/W]	1,79
Coeficiente Condutivo k módulo [W/m.K]	2,1
Velocidade do Ar externo [m/s]	16,67

FONTE: Autoria Própria

Para o cálculo da resistência equivalente do sistema utiliza-se a equação 4.5

$$R_{eq} = \frac{1}{h_{int} \cdot A} + \frac{l}{k \cdot A} + \frac{1}{h_{ext} \cdot A} + R_{aleta\ interna} + R_{aleta\ externa} = \frac{\Delta T}{q} \quad (4.5)$$

Onde,  $h_{int}$  é o coeficiente convectivo interno do tubo,  $k$  é o coeficiente condutivo do módulo,  $h_{ext}$  o coeficiente convectivo externo do tubo,  $l$  a espessura do módulo,  $A$  a área transversal do módulo,  $R_{aleta\ interna}$  e  $R_{aleta\ externa}$  são as resistências térmicas das aletas,  $\Delta T$  o diferencial de temperatura entre o gás e o ambiente e  $q$  o fluxo de calor.

Através dos dados obtidos da Tabela 5 e da equação 4.5, tem-se que a Resistência equivalente é 25,404 K .m<sup>2</sup>/W e o fluxo de calor é 11,022 W/m<sup>2</sup>.

Pode-se calcular as temperaturas do lado quente e frio através da equação 4.5, trabalhando a mesma para a forma:

$$R_{aleta} = \frac{T_c - T_h}{q} \quad (4.6)$$

Temos então  $T_h = 282,7^\circ\text{C}$  e  $T_c = 37,29^\circ\text{C}$ , a diferença entre temperaturas dos módulos de 245,4°C, que torna viável a instalação de um módulo, pois o mesmo poderá trabalhar com sua capacidade total.

## 6 RESULTADOS

Os resultados coletados foram transcritos para uma tabela MS-excel, para facilitar visualização.

Os dados foram coletados a cada 3 segundos, resultando num total de 80 amostras cada uma contendo um valor para temperatura da face quente, temperatura da face fria, voltagem resultante. A corrente e potência calculados estão apresentadas juntamente com a tabela para cada amostra. A tabela completa com todos os valores pode ser encontrada no Apêndice A.

A Tabela 6 abaixo apresentam alguns valores obtidos do experimento:

**Tabela 6 – Resumo de valores do experimento**

Amostra	Tempo [s]	Tc [°C]	Th [°C]	$\Delta T$ [°C]	U [V]	R [ $\Omega$ ]	I [A]	P [W]
1	0	23	23	0	0	5	0	0
2	3	23,2	24,1	0,9	0,2	5	0,04	0,008
3	6	23,4	25,3	1,9	0,3	5	0,06	0,018
...	...	...	...	...	...	...	...	...
14	39	25,8	51,2	25,4	1,36	5	0,272	0,36992
15	42	25,9	53,6	27,7	1,4	5	0,28	0,392
16	45	26,1	55,8	29,7	1,48	5	0,296	0,43808
17	48	26,3	57,3	31	1,53	5	0,306	0,46818
18	51	26,5	60,2	33,7	1,59	5	0,318	0,50562
...	...	...	...	...	...	...	...	...
34	99	29,7	99,7	70	2,15	5	0,43	0,9245
35	102	29,9	100,9	71	2,17	5	0,434	0,94178
36	105	30	102,2	72,2	2,18	5	0,436	0,95048
37	108	30,2	102,6	72,4	2,19	5	0,438	0,95922
38	111	30,5	103,7	73,2	2,19	5	0,438	0,95922
...	...	...	...	...	...	...	...	...
50	147	32,8	114,6	81,8	2,38	5	0,476	1,13288
51	150	32,9	115,8	82,9	2,38	5	0,476	1,13288
52	153	33,1	116,4	83,3	2,4	5	0,48	1,152
53	156	33,4	117,6	84,2	2,42	5	0,484	1,17128
54	159	33,6	118,7	85,1	2,43	5	0,486	1,18098

...	...	...	...	...	...	...	...	...
77	228	39	143,5	104,5	2,73	5	0,546	1,49058
78	231	39,5	144,3	104,8	2,75	5	0,55	1,5125
79	234	39,6	144,7	105,1	2,77	5	0,554	1,53458
80	237	39,8	145,6	105,8	2,78	5	0,556	1,54568

FONTE: Autoria própria

Obtendo esses resultados pode-se plotar dois gráficos, o primeiro mostrando o gradiente de temperatura contra a tensão produzida (Figura 21), e o segundo mostrando o gradiente de temperatura versus a potência produzida (Figura 22). Em ambos foram considerados os dois módulos juntamente, e para facilidade de visualização foram desconsiderados erros, tanto de medida como de medição.

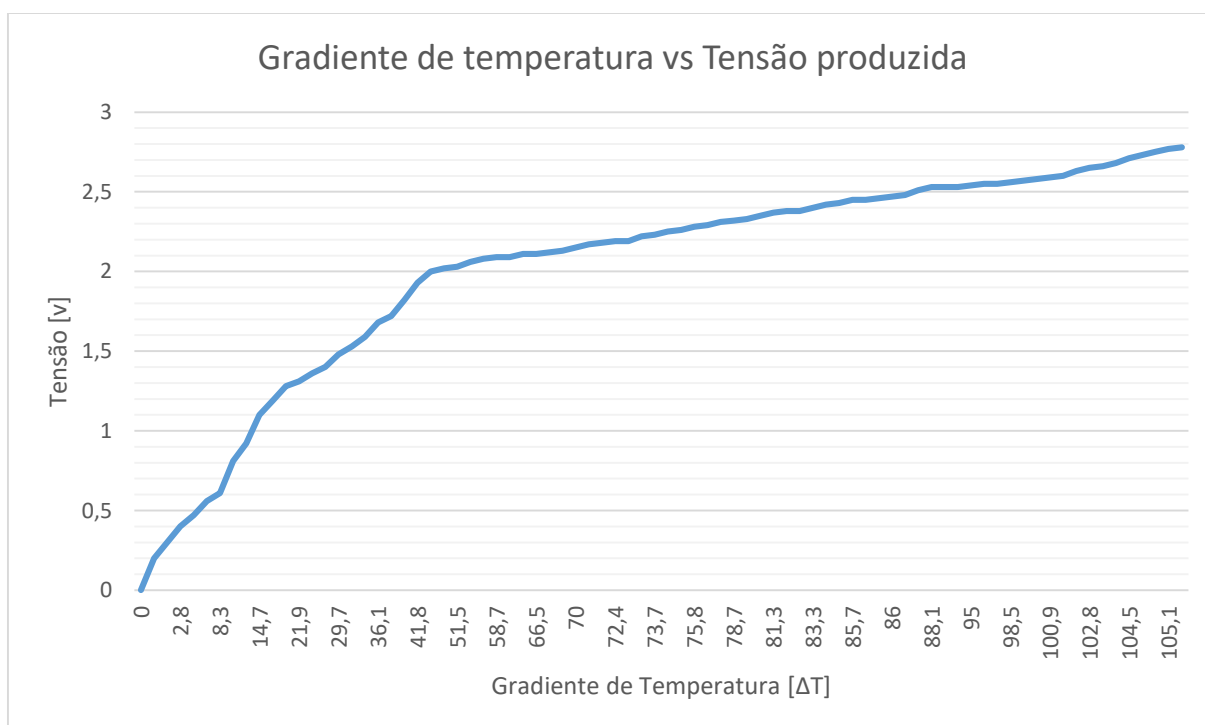
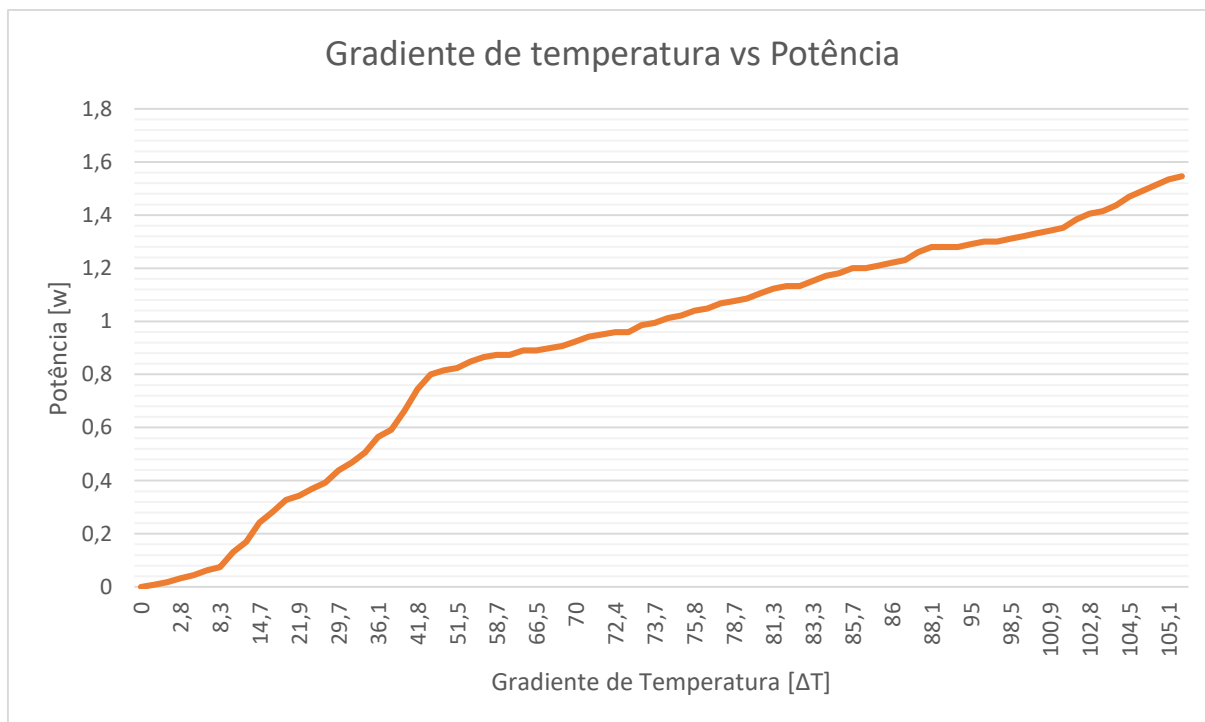


Figura 21 – Gradiente de temperatura [ΔT] vs Tensão produzida [v]

FONTE: Autoria própria



**Figura 22 – Gradiente de temperatura vs Potência**  
**FONTE: Autoria Própria**

## 6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Pode-se notar através da Figura 21 que a tensão teve um crescimento acentuado quando o gradiente de temperatura chegava a aproximadamente 50°C, a partir deste momento a curva apresentou um comportamento linear.

Devido ao limite de segurança para a temperatura dos módulos utilizados, o experimento necessitou ser interrompido. Fazendo com que a curva não se estabilizasse, não podendo então obter um valor máximo de produção confiável.

A Figura 22 mostra o gráfico relacionando a tensão com o gradiente de temperatura, como a potência tem uma relação direta com a tensão, os dois gráficos apresentam comportamento similares.

Observando a potência pode-se ter uma visualização melhor da não convergência da curva. Quanto maior o diferencial de temperatura entre as faces do módulo, maior a tensão e conseqüentemente maior a potência produzida pelo mesmo.

Foi possível encontrar no mercado internacional módulos fabricados diretamente para a produção de energia, possuindo vários modelos cada um para uma

aplicação, abrangendo diversas faixas de temperatura, para este projeto em resultado de análise foi escolhido um módulo considerado ideal para a aplicação.

Para a analisar a viabilidade de instalação do modelo proposto, no capítulo 5 deste presente trabalho foi calculado a viabilidade teórica do gerador, onde foi visto que com os dados obtidos através de informações de fornecedores a transferência de calor seria suficiente para a produção máxima dos módulos, infelizmente devido a problemas com o sistema de aquisição de dados este objetivo não pode ser comprovado experimentalmente.

Para a construção do acoplamento, a troca de calor dentro da geração se faz principalmente pelas aletas, um dos motivos para a baixa temperatura na face quente do módulo se dá pela eficiência da troca de calor da aleta, nota-se que a temperatura máxima não é muito alta o que indica que a troca de calor através da aleta não foi suficiente para suprir o desejado. Devido a geometria da mesma, com abas curtas e muito espaçadas, a troca de calor não é tão grande. Para obter uma troca mais eficiente outros modelos de trocadores de calor podem ser testados e aplicados. No lado externo devido a uma maior vazão de ar a troca de calor da aleta foi satisfatória, indicando que mesmo com sua geometria deficiente e baixo coeficiente de troca, devido a maior velocidade do ar a troca supriu o requisitado pelo experimento.

Considerando que a temperatura não varie muito com a distância entre os módulos dentro do gerador, para termos uma previsão inicial da potência gerada por vários módulos ligados em série, basta somarmos o valor individual de cada módulo, desconsiderando erros de montagem, características de transferência de calor em cada ponto do gerador, devido principalmente ao material e a montagem. Para considerações futuras, o estudo do comportamento do gradiente de temperatura dentro do gerador, da troca de calor de outros equipamentos e materiais é viável.

## 7 CONCLUSÃO

Através da revisão teórica e bibliográfica realizada no assunto, foi possível propor os objetivos do presente trabalho, e programar o tipo de teste necessário para a validação dos objetivos propostos.

O experimento não obteve a geração esperada devido ao uso de equipamentos similares aos específicos para a aplicação, mas mesmo utilizando destes materiais foi possível obter resultados positivos, comprovando que a aplicação de geradores pode ser mais aprofundada no futuro.

Este trabalho não foi focado no dimensionamento ideal de um trocador de calor para o gerador, pois utilizou-se aletas disponíveis no mercado, o que resultou em perdas de carga, para uma melhor eficiência a utilização de outros tipos de trocadores de calor como tubos de calor, o gerador apresentaria um rendimento melhor.

Este tipo de tecnologia tem potencial para recuperar parte da energia perdida de um motor a combustão interna, que de uma forma silenciosa e confiável aumenta a eficiência geral do carro, em projetos futuros onde o mesmo seja projetado juntamente com o escapamento, reduzindo assim o peso do gerador.

A maior deficiência atual desse tipo de tecnologia é a eficiência dos módulos que está em torno de 5%, com a pesquisa de novos materiais, novas aplicações e o aumento desta eficiência irá tornar esses geradores itens indispensáveis para aplicações em todo lugar onde exista fontes de calor sendo desperdiçadas.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

EDER, Andreas & LINDE, Matthias. Efficient and Dynamic – The BMW Group Roadmap for the Application of Thermoelectric Generators, 2011.

FAIRBANKS, John. Thermoelectric applications in vehicles status 2008. **US Department of Energy**, 2008.

HOLMBERG, Kenneth; ANDERSSON, Peter; ERDEMIR, Ali. Global energy consumption due to friction in passenger cars. **Tribology International**, v. 47, p. 221-234, 2012.

INCROPERA, P. F.; DEWITT, D. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 6ta. Edição. Editora LTC: Rio de Janeiro, 2008.

ISMAIL, Basel I.; AHMED, Wael H. Thermoelectric power generation using waste-heat energy as an alternative green technology. **Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical Engineering)**, v. 2, n. 1, p. 27-39, 2009.

ANDO JUNIOR, Oswaldo Hideo. **Protótipo de um microgerador termoelétrico para captação de energias residuais baseado no Efeito Seebeck com sistema de transferência de calor intercambiável**. Tese de Doutorado - 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.

MARTINS, Jorge et al. Thermoelectric exhaust energy recovery with temperature control through heat pipes. 2011.

MAZAR, Boris. State of the Art Prototype Vehicle With a Thermoelectric Generator, 2012.

NASCIMENTO, A. et al. Fontes Alternativas de Energia Elétrica: Potencial Brasileiro, Economia e Futuro. Bolsista de valor. **Revista de divulgação de Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense**. v. 2, p. 23-36, 2012.

DUTRA, Nickolas Gonçalves; MELO, Sarah Raposo. Estudo do aproveitamento dos gases de exaustão de um motor de combustão interna para geração de energia. 2015.

RIBEIRO JUNIOR, Elson Heraldo; PENTEADO, Rosangela de Fatima Stankowits. Modelo de trabalhos acadêmicos da UTFPR. Ponta Grossa, 2011.

RIFFAT, Saffa B.; MA, Xiaoli. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. **Applied Thermal Engineering**, v. 23, n. 8, p. 913-935, 2003.

SANTOS, Leonardo Paiva. **Análise de Desempenho de um Gerador Termoelétrico Baseado no Efeito Seebeck**. 2010. Dissertação (Mestrado). Universidade De Taubaté. Taubaté.

SAQR, Kh M.; MANSOUR, M. Kh; MUSA, M. N. Thermal design of automobile exhaust based thermoelectric generators: Objectives and challenges. **International Journal of Automotive Technology**, v. 9, n. 2, p. 155-160, 2008.

TEG Specification Sheet. TEG Specification Sheet Seebeck Thermoelectric Generator Part # 1261G-7L31-04CQ T max (320°C) TEG Specification Sheet, 2014. Disponível em: <http://www.customthermoelectric.com/>. Acesso em 05 mai 2016.

ROWE, David Michael (Ed.). **Thermoelectrics handbook: macro to nano**. CRC press, 2005.

FERNANDES, Alberto Emanuel Simões dos Santos. **Conversão de energia com células de Peltier**. 2012. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia.

CHAVEIRO TECH. Sistema Elétrico do Automóvel. Disponível em: <http://chaveirotech.blogspot.com.br/2012/07/sistema-eletrico-do-automovel.html>. Acesso em 26 de out de 2016.

TEC Data Sheet. TEC1-12706 Thermoelectric Cooler. Disponível em <http://www.hebeiltd.com.cn/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf>. Acesso em 26 de out de 2016.

RELAÇÃO DE PEÇAS. Fenite Dissipadores. Disponível em [http://www.fenitedissipadores.com.br/path/fenite/PGN\\_IMPRIMIR1.asp](http://www.fenitedissipadores.com.br/path/fenite/PGN_IMPRIMIR1.asp). Acesso em 26 de out de 2016.

MANUAL DE INSTRUÇÃO DO PRODUTO. Gamma Soprador Térmico. Disponível em [https://dl.dropboxusercontent.com/u/359190442/gammaBR/files/manuales/1445012132\\_hg025br\\_manual-soprador-t-rmico-x2\\_curvas.pdf](https://dl.dropboxusercontent.com/u/359190442/gammaBR/files/manuales/1445012132_hg025br_manual-soprador-t-rmico-x2_curvas.pdf). Acesso em 26 de out de 2016.

Arduino UNO Data Sheet. ATmega328P. Disponível em <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. Acesso em 16 de nov de 2016.

Sensor Allegro Data Sheet. Model ACS712. Disponível em [http://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet\\_ACS712.pdf](http://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_ACS712.pdf). Acesso em 16 de nov de 2016.



Nanoshield Termopar Data Sheet. Disponível em <https://www.circuitar.com.br/nanoshields/modulos/termopar/>. Acesso em 16 de nov de 2016.

Board L Data Sheet. Disponível em <https://www.circuitar.com.br/nanoshields/modulos/base-board-l/>. Acesso em 16 de nov de 2016.

**APENDICE A: TABELA DE RESULTADOS NUMÉRICOS OBTIDOS NO  
EXPERIMENTO**

**Tabela 7 – Resultados experimentais obtidos**

Amostra	Tempo	Tc	Th	$\Delta T$	V	R	A	W
1	0	23	23	0	0	5	0	0
2	3	23,2	24,1	0,9	0,2	5	0,04	0,008
3	6	23,4	25,3	1,9	0,3	5	0,06	0,018
4	9	23,6	26,4	2,8	0,4	5	0,08	0,032
5	12	23,7	28,1	4,4	0,47	5	0,094	0,04418
6	15	23,9	30,2	6,3	0,56	5	0,112	0,06272
7	18	24,1	32,4	8,3	0,61	5	0,122	0,07442
8	21	24,4	33,8	9,4	0,81	5	0,162	0,13122
9	24	24,7	35,3	10,6	0,92	5	0,184	0,16928
10	27	24,9	39,6	14,7	1,1	5	0,22	0,242
11	30	25,3	42,1	16,8	1,19	5	0,238	0,28322
12	33	25,5	43,5	18	1,28	5	0,256	0,32768
13	36	25,6	47,5	21,9	1,31	5	0,262	0,34322
14	39	25,8	51,2	25,4	1,36	5	0,272	0,36992
15	42	25,9	53,6	27,7	1,4	5	0,28	0,392
16	45	26,1	55,8	29,7	1,48	5	0,296	0,43808
17	48	26,3	57,3	31	1,53	5	0,306	0,46818
18	51	26,5	60,2	33,7	1,59	5	0,318	0,50562
19	54	26,7	62,8	36,1	1,68	5	0,336	0,56448
20	57	26,7	65,2	38,5	1,72	5	0,344	0,59168
21	60	27,2	66,1	38,9	1,82	5	0,364	0,66248
22	63	27,5	69,3	41,8	1,93	5	0,386	0,74498
23	66	27,7	72,8	45,1	2	5	0,4	0,8
24	69	27,8	75,4	47,6	2,02	5	0,404	0,81608
25	72	28,1	79,6	51,5	2,03	5	0,406	0,82418
26	75	28,5	81,2	52,7	2,06	5	0,412	0,84872
27	78	28,6	84,3	55,7	2,08	5	0,416	0,86528
28	81	28,8	87,5	58,7	2,09	5	0,418	0,87362
29	84	28,9	89,8	60,9	2,09	5	0,418	0,87362
30	87	28,9	92,9	64	2,11	5	0,422	0,89042
31	90	29,2	95,7	66,5	2,11	5	0,422	0,89042
32	93	29,4	98,6	69,2	2,12	5	0,424	0,89888
33	96	29,6	99,5	69,9	2,13	5	0,426	0,90738
34	99	29,7	99,7	70	2,15	5	0,43	0,9245
35	102	29,9	100,9	71	2,17	5	0,434	0,94178
36	105	30	102,2	72,2	2,18	5	0,436	0,95048
37	108	30,2	102,6	72,4	2,19	5	0,438	0,95922
38	111	30,5	103,7	73,2	2,19	5	0,438	0,95922
39	114	30,7	104,2	73,5	2,22	5	0,444	0,98568
40	117	30,9	104,6	73,7	2,23	5	0,446	0,99458
41	120	31,2	105,8	74,6	2,25	5	0,45	1,0125
42	123	31,4	107,1	75,7	2,26	5	0,452	1,02152
43	126	31,7	107,5	75,8	2,28	5	0,456	1,03968

44	129	31,8	108,2	76,4	2,29	5	0,458	1,04882
45	132	31,9	109,6	77,7	2,31	5	0,462	1,06722
46	135	31,9	110,6	78,7	2,32	5	0,464	1,07648
47	138	32,2	111,5	79,3	2,33	5	0,466	1,08578
48	141	32,5	112,9	80,4	2,35	5	0,47	1,1045
49	144	32,6	113,9	81,3	2,37	5	0,474	1,12338
50	147	32,8	114,6	81,8	2,38	5	0,476	1,13288
51	150	32,9	115,8	82,9	2,38	5	0,476	1,13288
52	153	33,1	116,4	83,3	2,4	5	0,48	1,152
53	156	33,4	117,6	84,2	2,42	5	0,484	1,17128
54	159	33,6	118,7	85,1	2,43	5	0,486	1,18098
55	162	33,8	119,5	85,7	2,45	5	0,49	1,2005
56	165	34,1	119,7	85,6	2,45	5	0,49	1,2005
57	168	34,3	120,1	85,8	2,46	5	0,492	1,21032
58	171	34,5	120,5	86	2,47	5	0,494	1,22018
59	174	34,8	120,9	86,1	2,48	5	0,496	1,23008
60	177	35	122,7	87,7	2,51	5	0,502	1,26002
61	180	35,4	123,5	88,1	2,53	5	0,506	1,28018
62	183	35,6	125,6	90	2,53	5	0,506	1,28018
63	186	35,8	128,8	93	2,53	5	0,506	1,28018
64	189	36,1	131,1	95	2,54	5	0,508	1,29032
65	192	36,5	133,6	97,1	2,55	5	0,51	1,3005
66	195	36,8	134,7	97,9	2,55	5	0,51	1,3005
67	198	36,9	135,4	98,5	2,56	5	0,512	1,31072
68	201	36,9	136,5	99,6	2,57	5	0,514	1,32098
69	204	37	137,3	100,3	2,58	5	0,516	1,33128
70	207	37,2	138,1	100,9	2,59	5	0,518	1,34162
71	210	37,5	138,7	101,2	2,6	5	0,52	1,352
72	213	37,6	140,1	102,5	2,63	5	0,526	1,38338
73	216	37,8	140,6	102,8	2,65	5	0,53	1,4045
74	219	37,9	141,8	103,9	2,66	5	0,532	1,41512
75	222	38	142,6	104,6	2,68	5	0,536	1,43648
76	225	38,7	143,2	104,5	2,71	5	0,542	1,46882
77	228	39	143,5	104,5	2,73	5	0,546	1,49058
78	231	39,5	144,3	104,8	2,75	5	0,55	1,5125
79	234	39,6	144,7	105,1	2,77	5	0,554	1,53458
80	237	39,8	145,6	105,8	2,78	5	0,556	1,54568

**FONTE: Aatoria Própria**