

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
**Carlos Alfredo Rodrigues de Carvalho**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO  
DO CALOR DE ESCAPE PARA GERAÇÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA EM AUTOMÓVEIS**

**Taubaté, SP**  
**2012**

**Carlos Alfredo Rodrigues de Carvalho**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO  
DO CALOR DE ESCAPE PARA GERAÇÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA EM AUTOMÓVEIS**

Dissertação apresentada para obtenção do Título  
de Mestre pelo curso de Mestrado do  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade de Taubaté.  
Área de Concentração: Projeto Mecânico  
Orientador: Prof. Dr. José Rui Camargo

**Taubaté, SP  
2012**

**CARLOS ALFREDO RODRIGUES DE CARVALHO**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO DO CALOR DE ESCAPE  
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM AUTOMÓVEIS**

Dissertação apresentada para obtenção do Título  
de Mestre pelo curso de Mestrado do  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade de Taubaté.  
Área de Concentração: Projeto Mecânico

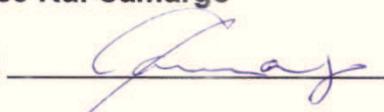
Data: 15 de dezembro de 2012.

Resultado: APROVADO

**BANCA EXAMINADORA**

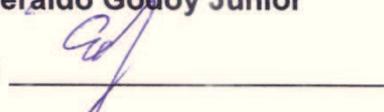
**Prof. Dr. José Rui Camargo**

**Universidade de Taubaté**

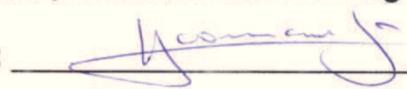
Assinatura: 

**Prof. Dr. Ederaldo Godoy Júnior**

**Universidade de Taubaté**

Assinatura: 

**Prof. Dr. Edilson Alexandre de Camargo** DCTA

Assinatura: 



Dedico este trabalho à minha esposa Leticia pelo apoio e incentivo durante todo esse período.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por permitir a realização deste trabalho.

À minha esposa Leticia pelo apoio e incentivo durante todo o curso.

Ao Professor Dr. José Rui Camargo pela orientação, incentivo, e ajuda no direcionamento dos trabalhos e elaboração de artigo.

Ao corpo docente do Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Professor Dr. Wendell Lamas pelo apoio na elaboração e publicação de um artigo.

Ao técnico de laboratório “Flavinho” e aos estagiários pelo auxílio na execução dos ensaios

## RESUMO

Atualmente um dos grandes responsáveis pela emissão de CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono) são os veículos movidos a motor de combustão interna, em sua maioria os automóveis. Pesquisas recentes têm mostrado maneiras de aumentar a eficiência dos automóveis por meio do aproveitamento do calor de exaustão para geração de energia elétrica, com conseqüente redução no consumo de combustível. Esta dissertação tem por objetivo apresentar um estudo de viabilidade técnica de um gerador termoelétrico aproveitando o calor residual dos gases de exaustão de um motor de combustão interna para geração de energia elétrica. O trabalho apresenta o modelamento matemático e a implementação de um protótipo para realização dos ensaios para a obtenção de resultados experimentais. O protótipo foi montado utilizando módulos termolétricos cujo princípio de funcionamento é baseado nos efeitos Seebeck e Peltier, que devido ao conceito de reversibilidade podem funcionar como geradores elétricos, aquecedores ou refrigeradores. Por meio das equações teóricas e dos resultados dos ensaios experimentais foi possível avaliar o desempenho do sistema de geração de energia elétrica, determinar o comportamento dos principais parâmetros envolvidos e finalmente concluir sobre a exequibilidade e viabilidade do projeto.

**Palavras-chave:** Calor residual, Efeito Seebeck, Gerador termoelétrico

## **ABSTRACT**

Currently one of the most responsible for CO<sub>2</sub> (Carbon Dioxide) emissions are vehicles powered by internal combustion engine, in their majority the automobiles. Recent research has shown ways to improve the efficiency of automobiles through the use of exhaust heat to generate electric power, with consequent reduction in fuel consumption. This paper aims to present a technical feasibility study of a thermoelectric generator using the residual heat from exhaust gases of an internal combustion engine to generate electric power. The paper presents the mathematical modeling and implementation of a prototype for tests to obtaining experimental results. The prototype was assembled using thermoelectric modules whose operating principle is based on the phenomena called Seebeck and Peltier Effects, which due to the concept of reversibility can act as electric generators, heaters or coolers. Through the theoretical equations and experimental results it was possible to evaluate the performance of electric power generation system, determine the behavior of the main parameters and finally conclude on the feasibility and viability of the project.

**Keywords:** Residual heat, Seebeck effect, thermoelectric generator

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de Sankey da distribuição de energia do combustível no veículo movido por MCI. ....	26
Figura 2 - Caminhão com módulo termoelétrico instalado (a) e o gerador termoelétrico utilizado (b) .....	28
Figura 3 – Local de instalação do gerador no escapamento. ....	29
Figura 4 - Demonstração do efeito Peltier para aquecimento (a) e absorção de calor (b).....	33
Figura 5 - Aplicação do efeito Peltier com diferentes materiais e representação do sentido da corrente elétrica. ....	33
Figura 6 - Princípio do efeito Seebeck: orientação dos elétrons no sentido junção quente–junção fria. ....	34
Figura 7 - Efeito Seebeck como sensor de temperatura (a) e como gerador de energia elétrica (b). ....	35
Figura 8 - Termopar com diferentes metais A e B.....	36
Figura 9 - Dissipadores de calor de várias geometria .....	40
Figura 10 - Dissipador resfriado com ventilação forçada. ....	40
Figura 11 - Esboço construtivo de um módulo termoelétrico.....	41
Figura 12 - Módulo termoelétrico comercial. ....	42
Figura 13 - Funcionamento de um módulo termoelétrico como gerador.....	45
Figura 14 - Circuito elétrico correspondente de um módulo termoelétrico convencional. ....	46
Figura 15 - Circuito elétrico correspondente de um módulo termoelétrico, com carga conectada.....	46
Figura 16 - Esquema representativo teórico de um gerador termoelétrico.....	51
Figura 17 - Motor a combustão modelo Intek I/CR OHV, 10HP. ....	52
Figura 18 - Bancada experimental para determinação da altura do suporte.....	53
Figura 19 - Medições de temperatura no lado quente (Th) e frio (Tc). ....	53
Figura 22 - Esquema de um sistema de geração termoelétrica com carga resistiva.....	54
Figura 20 - Temperatura do lado quente (Th) x Tempo para diferentes distâncias (d). ....	57
Figura 21 - $\Delta T$ x Tempo para diferentes distâncias (d).....	58
Figura 23 – Tensão na Carga x $\Delta T$ para dois módulos conectados em série. ....	58

Figura 24 – Potência x $\Delta T$ para dois módulos conectados em série.....	59
Figura 25 – Rendimento x $\Delta T$ para dois módulos conectados em série.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais e respectiva condutividade térmica.....	38
Tabela 2 - Propriedades termoelétricas de diferentes materiais. ....	44
Tabela 3 - Especificações do Módulo TE Technology 40mm x 40mm x 3,9mm .....	56

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

$A, s$	Área da seção transversal	$[m^2]$
$dx$	Incremento diferencial de comprimento	$[m]$
$d$	Distância	$[m]$
$dT$	Gradiente de temperatura	$[^{\circ}C, K]$
$h$	Coefficiente de transferência de calor por convecção	$[W/m^2K]$
$I$	Intensidade da corrente elétrica	$[A]$
$I_L$	Corrente elétrica na carga	$[A]$
$\kappa$	Condutividade térmica	$[W/^{\circ}C.m]$
$K$	Condutância térmica	$[W/^{\circ}C]$
$N$	Número de junções do módulo	[adimensional]
$P_L$	Potência elétrica na carga	$[W]$
$P_{max}$	Potência máxima gerada	$[W]$
$q$	Taxa de condução de calor por unidade de área	$[W/m^2]$
$q_h$	Calor absorvido pela fonte quente	$[W]$
$q_c$	Calor dissipado pela fonte fria	$[W]$
$\dot{Q}$	Fluxo de calor	$[W]$
$Q_c$	Calor transferido para fonte fria	$[W]$
$Q_h$	Calor transferido para fonte quente	$[W]$
$Q_J$	Taxa de calor transferido por efeito Joule	$[W]$
$Q_P$	Taxa de transferência de calor por efeito Peltier	$[W]$
$Q_T$	Taxa de transferência de calor por efeito Thomson	$[W]$
$R$	Resistência elétrica	$[\Omega]$
$R_L$	Resistência elétrica da carga	$[\Omega]$
$R_i$	Resistência elétrica interna do módulo	$[\Omega]$

$R_{\text{max.pot.}}$	Resistência para potência máxima	[ $\Omega$ ]
T	Temperatura absoluta	[ $^{\circ}\text{C}$ , K]
$T_c$	Temperatura do lado frio do módulo termoelétrico	[ $^{\circ}\text{C}$ , K]
$T_h$	Temperatura do lado quente do módulo termoelétrico	[ $^{\circ}\text{C}$ , K]
$V_i$	Tensão elétrica de Seebeck	[V]
$V_0$	Tensão elétrica de saída do módulo	[V]
$V_R$	Tensão elétrica na carga	[V]
l	Comprimento	[m]
Z	Figura de Mérito	[ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ , $\text{K}^{-1}$ ]
ZT	Figura de Mérito	[adimensional]
$\alpha$	Coefficiente de Seebeck	[ $\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ]
$\alpha_a$	Coefficiente Seebeck do metal A	[ $\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ]
$\alpha_b$	Coefficiente Seebeck do metal B	[ $\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ]
$\alpha_n$	Coefficiente Seebeck dos semicondutores tipo N	[ $\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ]
$\alpha_p$	Coefficiente Seebeck dos semicondutores tipo P	[ $\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ]
$\rho$	Resistividade elétrica	[ $\Omega \cdot \text{m}$ ]
$\tau$	Coefficiente de Thomson	[ $\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ]
$\pi$	Coefficiente de Peltier	[V]
$\Delta T$	Diferença de temperatura	[ $^{\circ}\text{C}$ , K]
$\Delta V$	Diferença de potencial elétrico	[V]
$\eta$	Rendimento	[adimensional]
d.d.p.	Diferença de potencial	[V]
f.e.m.	Força eletromotriz	[V]
HP	Horse Power (Cavalos de Potência)	[HP]
MCI	Motor de Combustão Interna	

GLP Gás Liquefeito de Petróleo

GTE Gerador Termoelétrico

## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1 - Introdução</b> .....	<b>15</b>
1.1 Considerações Iniciais .....	15
1.2 Motivação .....	16
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 Objetivo Geral.....	17
1.3.2 Objetivos Específicos .....	17
1.4 Estrutura da Dissertação.....	18
<b>Capítulo 2 – Estado da Arte</b> .....	<b>20</b>
2.1 Pesquisa Bibliográfica.....	20
2.2 Aplicações Práticas de Módulos Termoelétricos .....	25
2.3 Aplicações de Geradores Termoelétricos em Veículos Automotores.....	26
<b>Capítulo 3 – Fundamentação Teórica</b> .....	<b>30</b>
3.1 Princípio da Conversão Termoelétrica Direta .....	30
3.2 Efeito Joule.....	30
3.3 Efeito Thomson .....	31
3.4 Efeito Peltier .....	32
3.5 Efeito Seebeck .....	34
3.6 Termopar .....	35
3.7 Transferência de Calor.....	36
3.8 Dissipadores de Calor .....	39
3.9 Módulos Termoelétricos .....	41
3.10 Figura de Mérito .....	42
3.11 Modelamento Matemático do Gerador Termoelétrico.....	44
3.12 Potência Máxima de Saída .....	48
3.13 Rendimento .....	49
<b>Capítulo 4 - Testes</b> .....	<b>51</b>
4.1 Metodologia.....	51
4.2 Testes para determinação da altura do módulo.....	52
4.3 Montagem do sistema de geração .....	54
<b>Capítulo 5 – Resultados e Discussões</b> .....	<b>57</b>
<b>Capítulo 6 – Considerações Finais</b> .....	<b>61</b>
6.1 Conclusões.....	61
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros .....	61
<b>Referências</b> .....	<b>63</b>

## Capítulo 1 - Introdução

### 1.1 Considerações Iniciais

As preocupações com as questões ambientais têm se tornado o foco de discussões nas últimas décadas, principalmente no que diz respeito ao consumo de recursos naturais e a poluição atmosférica, em particular, os efeitos causados pelo aquecimento global.

A utilização de combustíveis fósseis têm se tornado uma preocupação crescente por parte dos ambientalistas e pesquisadores, no sentido de reduzir sua dependência, visto que, é uma das fontes energéticas mais poluidoras e também por ser uma fonte de energia não renovável, que se tornará escassa em um futuro próximo.

As indústrias são alvo de grande preocupação, no entanto, existem outras fontes de consumo de energia que suscitam também esta preocupação, um exemplo importante é o caso dos automóveis. Um dos grandes fatores que contribuem para este problema reside na dependência, em sua grande maioria, destes combustíveis. Os automóveis têm se tornado os grandes emissores de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), o principal gás responsável pelo efeito estufa, e, conseqüentemente, pelo aquecimento global.

Na tentativa de reduzir esta dependência de combustíveis fósseis, os cientista e pesquisadores têm buscado novas fontes de energia, como por exemplo, energia solar, eólica, geotérmica e até mesmo energia das marés. Já no caso dos automóveis, a busca tem sido por combustíveis menos poluentes, como bicombustíveis, veículos híbridos elétricos, veículos puramente elétricos e veículos movidos a hidrogênio.

A busca por novas tecnologias para a geração de energia elétrica colabora com o conceito mais amplo de conservação de energia, ou reaproveitamento energético, mais especificamente, aproveitamento do calor dissipado tanto nos processos industriais quanto nos automóveis para geração de energia elétrica, conhecido como conversão termoelétrica direta, baseada no efeito termoelétrico.

Existem inúmeras formas de se aproveitar o efeito termoelétrico. As mais conhecidas e aplicadas são a geração de energia elétrica e a refrigeração, que utilizam módulos termoelétricos, feitos com elementos semicondutores tipo p-n entre duas placas de cerâmica. Um estudo mais detalhado destes componentes é apresentado no item 3.10.

Hoje em dia encontram-se aplicações de módulos termoelétricos em diferentes áreas, tais como: militar, aeroespacial, medicina, microeletrônica, sensores, entre outros (SANTOS, 2007). O foco deste trabalho está no aproveitamento do calor de escape de veículos automotores, utilizando módulos termoelétricos para geração de energia elétrica para seu próprio consumo.

A conversão termoelétrica direta se caracteriza por ser um processo de conversão de energia térmica (calor) em energia elétrica, sem a presença de partes móveis (geradores elétricos convencionais), feita por meio de módulos termoelétricos. O princípio fundamental de funcionamento destes módulos é baseado no Efeito Seebeck, que foi observado pela primeira vez pelo físico Thomas Johann Seebeck, em 1821 quando ele juntou dois fios de metais diferentes (fio de cobre e fio de bismuto) para formar um circuito. A junção era feita pela ligação dos dois fios entre si. Ele então descobriu que aquecendo um lado a uma temperatura elevada, e o outro permanecendo a uma temperatura mais fria, iria gerar um campo elétrico ao redor do circuito de diferentes temperaturas. Durante o desenvolvimento deste trabalho, serão apresentados mais detalhes sobre a teoria do efeito Seebeck e sobre os módulos termoelétricos.

De acordo com pesquisas recentes a utilização destes módulos tem se mostrado uma tendência como fonte alternativa de energia elétrica, porém existem muitas limitações quanto aos materiais empregados e a eficiência dos módulos.

## **1.2 Motivação**

A maior parte da energia dos combustíveis utilizados hoje se perde na forma de calor, apenas uma parte da energia utilizada é realmente transformada em trabalho (FARIAS, 2009). Isto pode ser visto claramente nas usinas termoelétricas, caldeiras e motores de combustão interna, que tem uma eficiência muito baixa.

Cerca de 2/3 da energia do combustível consumido em um automóvel é perdido sob a forma de calor (HSIAO *et al*, 2010).

O aproveitamento deste calor da exaustão dos veículos com motores de combustão interna permite produzir energia para alimentar baterias e outros componentes elétricos do automóvel, através do uso dos módulos termoelétrico baseados no Efeito Seebeck. Com o uso desta tecnologia pretende-se aproveitar o calor perdido nos gases de exaustão do motor e transformá-lo em energia elétrica que pode ser utilizada no próprio veículo, como, por exemplo, recarregar celulares e aparelhos de GPS, substituindo parte da energia fornecida pelo alternador.

Como o consumo de eletricidade no veículo influi diretamente no consumo de combustível, devido à potência entregue pelo alternador, essa tecnologia permitiria que o veículo consumisse menos combustível e, conseqüentemente emitiria menos CO<sub>2</sub>, conforme estudos realizados por Fairbanks (2008) e Yang (2007). Por esta razão a conversão termoelétrica direta para aplicação em automóveis tem se tornado bastante atrativa e tem sido alvo de inúmeras pesquisas nos últimos anos.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo de viabilidade técnica para o aproveitamento do calor desperdiçado nos gases de exaustão de motores de combustão interna para geração de energia elétrica para consumo do próprio veículo.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

A solução escolhida passa pela utilização de módulos termoelétricos funcionando como geradores de energia elétrica (Efeito Seebeck). Os objetivos específicos são os seguintes:

Apresentar um estudo teórico sobre os módulos termoelétricos, bem como as formulações matemáticas que regem seu funcionamento como gerador de eletricidade.

Construir um protótipo para realizar ensaios em bancada utilizando módulos termoelétricos comerciais e a energia térmica dos gases de exaustão de um motor de combustão interna para gerar energia elétrica.

A partir dos resultados dos ensaios, analisar os principais parâmetros do gerador, comparando com os conceitos teóricos e assim poder avaliar seu desempenho e viabilidade na utilização em um automóvel.

## **1.4 Estrutura da Dissertação**

No primeiro capítulo é apresentado o contexto atual da utilização de energia e sua implicação nos impactos ambientais, bem como a possibilidade do aproveitamento do calor de exaustão de motores veiculares, por meio da utilização de geradores termoelétricos de conversão direta como fonte alternativa de eletricidade para consumo próprio, e conseqüente economia de energia. Neste capítulo também são apresentados os principais objetivos a serem alcançados.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica com as pesquisas e os estudos publicados recentemente, sobre os quais foi baseado todo desenvolvimento teórico do trabalho. Ainda neste capítulo são apresentadas as principais utilizações dos módulos termoelétricos, enfatizando as aplicações na indústria automobilística.

No terceiro capítulo são abordados os conceitos relacionados com a termoeletricidade e o desenvolvimento das equações que permitem avaliar o desempenho de um sistema de geração termoelétrica por conversão direta. São também discutidos, o modelo térmico e elétrico de um módulo termoelétrico baseado no efeito Seebeck, além de conceitos de transferência de calor amplamente aplicados na avaliação global de um gerador termoelétrico.

O capítulo quatro apresenta a metodologia adotada para os ensaios em bancada, os materiais utilizados na construção dos protótipos, instrumentação para aquisição dos dados. Já o capítulo cinco mostra os resultados dos testes realizados

em laboratório e uma discussão dos principais parâmetros relacionados com o desempenho do gerador termoelétrico.

O capítulo seis apresenta as conclusões e as propostas de trabalhos futuros. Para finalizar o trabalho são apresentadas todas as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento do mesmo.

## Capítulo 2 – Estado da Arte

### 2.1 Pesquisa Bibliográfica

Os princípios e teorias dos efeitos termoelétricos vêm sendo estabelecidos ao longo do tempo por vários pesquisadores. De acordo com Farias (2009), a termoeletricidade tem a sua origem com Alessandro Volta em 1800 que concluiu que a eletricidade causadora dos espasmos nas pernas do sapo estudadas por Luigi Galvani em 1780 era devida a um contato entre dois metais dissimilares. Essa conclusão foi precursora do princípio do termopar.

Após estas descobertas, outros cientistas passaram a pesquisar os efeitos termoelétricos, dos quais se destacam Thomas Seebeck em 1821, Jean Peltier em 1834 e Joseph Thomson em 1848, que deram origem às denominações dos três efeitos termoelétricos, diferentes, mas relacionados entre si. Seus estudos contribuíram para o entendimento destes fenômenos e sua fundamentação científica.

As pesquisas nesta área vêm evoluindo ao longo dos anos, e existem vários trabalhos publicados recentemente.

Yang (2007) apresenta as diversas aplicações de módulos termoelétricos, como, por exemplo, geração de energia em áreas remotas, pequenos refrigeradores e aquecimento veicular. O trabalho foca na utilização dos módulos na geração de energia utilizando calor rejeitado tanto no escape quanto no circuito de arrefecimento do motor como forma de reduzir o consumo de combustível.

Os resultados dos estudos demonstraram que existem projetos de geradores capazes de substituir alternadores de até 1kW de potência, o que pode levar a uma economia de até 10% no consumo de combustível.

Camargo *et al* (2008) fizeram um estudo sobre um gerador termoelétrico baseado no efeito Seebeck, onde se tem um sistema composto de módulos termoelétricos e uma fonte de calor. Nesse sistema a tensão é gerada quando os lados do módulo termoelétrico estão expostos a diferentes temperaturas, ou seja, um lado do módulo está mais quente que o outro, criando-se assim uma diferença de temperatura.

Niu *et al* (2009) construíram uma unidade de geração utilizando módulos termoeletrônicos comerciais e um trocador de calor de placas paralelas. O experimento permitiu entender a influência das principais condições de operação, como as temperaturas de entrada dos fluidos quente e frio, as taxas de fluxo e a carga resistiva. Sendo a temperatura do fluido quente e a taxa de fluxo as que mais afetaram a máxima potência de saída e, conseqüentemente, a eficiência da unidade.

Os resultados experimentais foram comparados com valores do modelo numérico, e demonstraram ser um bom guia para aprimoramento e otimização do modelo matemático para geradores com aproveitamento de calor com baixas temperaturas.

Rodríguez *et al* (2009) desenvolveram um modelo computacional para simular o comportamento térmico e elétrico dos geradores termoeletrônicos, por meio de equações termoeletrônicas e de transferência de calor. O modelo utiliza como entradas os parâmetros como função da temperatura. Os parâmetros de saída analisados foram temperatura, desempenho, potência elétrica, tensão e corrente gerados. Para validação do modelo e determinar o nível de precisão foi construído um termogerador de bancada, o erro do modelo foi menor que 5%. Foram realizados estudos levando em conta a influência da temperatura da sala e da resistência da carga na potência de saída do gerador.

Hsiao *et al* (2010) constataram que cerca de 2/3 da energia do combustível consumido em um automóvel é descarregado na forma de calor rejeitado. E uma forma de reaproveitar parte deste calor seria por meio da utilização de geradores termoeletrônicos para conversão em eletricidade.

Como forma de prever o comportamento destes módulos, foi proposto um modelo de resistências térmicas unidimensional para comparar a eficiência da utilização de um gerador termoeletrônico localizado no tubo de escape de gases em relação a sua instalação no radiador de arrefecimento. Os resultados da simulação foram verificados com dados experimentais, e se mostrou consistente.

O estudo concluiu que a potência gerada do sistema instalado no tubo de escapamento é maior do que a do sistema instalado no sistema de arrefecimento, devido à maior diferença de temperatura.

Yu e Chau (2009) propuseram uma forma de maximizar a energia armazenada em baterias automotivas aproveitando o calor rejeitado em veículos que utilizam motor de combustão interna, produzindo energia elétrica utilizando módulos

Peltier. Para regular a tensão de carregamento da bateria foi implementado um conversor DC-DC, maximizando a tensão transferida e minimizando os distúrbios entre o GTE e a bateria.

Estudos experimentais demonstraram que a utilização do conversor melhorou a performance de 14,5% a 22,6% comparado com a não utilização do mesmo.

Palácios *et al* (2009) desenvolveram uma metodologia para estimar parâmetros internos de módulos Peltier para aplicações não usuais, não especificadas nas folhas de dados dos fabricantes, a partir das curvas de performance, permitindo a previsão do desempenho e comportamento dos módulos em diferentes condições de trabalho.

A simulação e testes experimentais foram realizados para obter os parâmetros Peltier para projetos de refrigeração e parâmetros Seebeck para aplicação na geração termoelétrica.

Farias (2009) construiu um protótipo de um microgerador termoelétrico de estado sólido utilizando calor da queima de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo). Os estudos determinaram a eficiência térmica, elétrica e global do sistema, deixando claro a influência da diferença de temperatura em cada uma delas e as limitações de temperatura dos módulos informadas pelo fabricante.

Gou *et al* (2010) direcionaram seus estudos para termogeradores de conversão direta que operam em baixa temperatura. Foi estudada a influência da irreversibilidade térmica na transferência de calor na geração termoelétrica e a utilização de vários módulos em série. Como forma de aumentar a eficiência dos GTEs, o estudo concluiu que além de aumentar a temperatura da face quente (calor rejeitado) e utilizar uma série de módulos, é importante aumentar a capacidade de troca térmica do lado frio.

Estudos teóricos e experimentais demonstraram que isso é possível aumentando a superfície dos dissipadores de calor e utilizando ventilação forçada.

Lavric (2010) desenvolveu um modelo detalhado para caracterizar a operação de geradores termoelétricos. O modelo permitiu uma análise da sensibilidade da performance do módulo em relação à geometria, resistências elétrica e térmica, qualidade das fontes e dissipadores de calor, como temperatura e condutância térmica. O desempenho dos módulos pode ser aumentado melhorando o coeficiente de transferência de calor, especialmente do lado quente.

Ibrahim *et al* (2010) realizaram um estudo experimental para explorar os efeitos práticos da implementação de módulos termoelétricos no reaproveitamento de gases de exaustão. Os resultados indicam que a potência produzida aumenta com o aumento da temperatura do lado quente e mantendo-se a taxa da temperatura do refrigerante.

Santos (2010) analisou o desempenho de um gerador termoelétrico baseado no efeito Seebeck. Para realização do estudo foi utilizado um protótipo que utiliza o calor dos gases de escape de um pequeno motor de 10HP. O estudo concluiu que os parâmetros mais importantes neste tipo de geração são a diferença de temperatura entre os lados quente e frio, a tensão gerada, a influência da carga resistiva e a temperatura máxima admitida pelos módulos, que se mostrou um fator limitante na geração com células termoelétricas.

Casano e Piva (2011) realizaram uma investigação experimental utilizando múltiplas células Peltier, no modo Seebeck (geração de energia elétrica). Foram comparados dados experimentais com valores calculados para variação de potência e eficiência em função de diferentes parâmetros, como quantidade de módulos, variação da carga resistiva e diferença de temperatura fria e quente.

Os resultados mostraram que a potência máxima é gerada para uma carga resistiva, quando esta resistência é igual à resistência interna do módulo. E chegou-se a conclusão que quanto maior a quantidade de módulos utilizados e a diferença de temperatura maior a potência gerada.

Jang *et al* (2011) simularam o comportamento dos módulos termoelétricos utilizando modelos tridimensionais. O trabalho teve como foco investigar o papel das dimensões dos módulos, como largura, espessura do substrato e área dos termo-elementos, na potência gerada e sua eficiência.

As equações utilizadas no modelo foram derivadas dos efeitos Seebeck e Peltier, e submetidos a análise de elementos finitos. Como hipótese, foram considerados substratos de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  e  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ . A simulação trouxe diretrizes para projetos de GTEs de alta performance.

Champier, *et al* (2011) propuseram um gerador termoelétrico reaproveitando o calor de fogões à lenha. O projeto prevê a utilização de módulos de Telureto de Bismuto  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  com limite de temperatura contínua de 320 °C para o lado quente e de no máximo 200 °C para o lado frio.

Foi conectado ao módulo um dispositivo regulador de tensão. O gerador produziu 6,7V estabilizado e uma potência de saída de 7,6W, sendo que a potência gerada pelo módulo foi de 9,5W, cerca de 20% foi perdido no regulador de tensão. Foram realizados estudos sobre a influência da compressão entre os contatos térmicos, concluindo-se que a partir de 5bar é possível conseguir uma potência elétrica de saída suficiente.

Antunes (2011) também estudou o reaproveitamento dos gases de escape de veículos automotores associado à utilização de células termoelétricas para geração de eletricidade. Implementou-se um sistema de controle de temperatura, visto que a temperatura dos gases de escape é muito alta e ultrapassa a temperatura limite dos módulos.

O sistema de controle de temperatura é composto, basicamente, por *Heat Pipes*, que são tubos metálicos, normalmente de cobre ou alumínio, fechados com um fluido de trabalho no seu interior, que é o responsável pela transferência de calor do tubo de escape até os módulos termoelétricos, numa temperatura suportada pelos mesmos.

Bélanger e Gosselin (2011) utilizaram algoritmos genéticos para simular o comportamento e otimizar a utilização de módulos em trocadores de calor de fluxo cruzado.

O trabalho determinou a influência da quantidade, localização dos módulos no trocador de e da distribuição de temperatura (não uniforme) no trocador de calor. Como forma de aperfeiçoar o sistema de geração, determinou-se a melhor topologia elétrica para montagem dos módulos.

Meng *et al* (2011) desenvolveram um modelo numérico de um gerador termoelétrico comercial utilizando como fonte quente um trocador de calor aletado, combinando conceitos de termodinâmica e transferência de calor. O desempenho do termogerador foi simulado utilizando como parâmetros as propriedades físicas, dimensões geométricas, temperatura e fluxo de calor. Para realização dos ensaios foi utilizado como fonte quente e fria água a 100 °C e 27 °C, respectivamente e 127 módulos termoelétricos. O estudo concluiu que a diferença de temperatura entre as junções e a tensão de saída é uma função linear da corrente elétrica de saída.

Huang *et al* (2011) introduziram o conceito de “Coeficiente de Seebeck Efetivo”, o qual discute a inconsistência entre o coeficiente medido e o coeficiente teórico. Tal diferença é explicada devido ao efeito de contato e a rede de

resistências térmicas do próprio módulo. O estudo concluiu que na prática as propriedades do material são menores do que na teoria.

Hsu *et al* (2011) idealizaram um modelo e construíram, na prática, um sistema utilizando 24 módulos geradores termoelétricos para converter o calor de exaustão do tubo de escapamento de um automóvel em energia elétrica. A eficiência do sistema foi simulada e comprovada por meio experimental. Chegou-se a conclusão que a eficiência era cerca de 0,3%, devido ao pequeno calor de entrada do módulo, por conta do próprio limite de temperatura para manter sua integridade física. Apesar da baixíssima eficiência deve-se levar em conta que o custo do calor desperdiçado deve ser considerado muito baixo, ou praticamente nulo. Consequentemente, a baixa eficiência de conversão não foi uma questão tão importante a ser levada em conta.

## **2.2 Aplicações Práticas de Módulos Termoelétricos**

Na indústria os módulos termoelétricos são utilizados no resfriamento de pequenos lasers, refrigeradores de diodo, pequenos geradores de corrente contínua que aproveitam o calor rejeitado por processos industriais, em circuitos de telecomunicação, etc..

Tem grande aplicação no mercado de petróleo e gás, utilizado em sistemas de proteção catódica e instrumentação, principalmente em áreas de difícil acesso à eletricidade.

Outra importante aplicação dos módulos é utilizá-los como gerador em áreas remotas (JONES *et al*, 2011), principalmente no uso doméstico, como alimentação de sistemas de comunicação, computadores portáteis (MUHTAROGLU *et al*, 2008), segurança, micro-refrigeradores e ar-condicionado (SILVA, 2010), podendo utilizar com fonte quente o calor de fogões à lenha (CHAMPIER *et al*, 2011)

Conforme Farias (2009), na indústria aeroespacial foi onde se obteve os maiores avanços e aplicações da termoeletricidade, devido à impossibilidade de se conectar à rede elétrica. A partir das aplicações nesta área é que foi possível justificar o seu emprego comercial.

Na indústria automobilística já são utilizados para aquecer e resfriar bancos (FAIRBANKS, 2008), e o próximo objetivo é aplicar na geração de eletricidade para consumo próprio, que será melhor explicado no item 2.3, deste capítulo.

## 2.3 Aplicações de Geradores Termoeletrônicos em Veículos Automotores

O consumo de combustíveis fósseis em automóveis é uma das maiores questões discutidas atualmente no mundo, principalmente no campo de energia e meio-ambiente, particularmente em relação às emissões de dióxido de carbono dos veículos movidos a motor de combustão interna. De acordo com as pesquisas somente cerca de 30% da energia dos combustíveis é transformada em trabalho efetivo (IBRAHIM *et al*, 2010). De acordo com Zhang *et al* (2008), os 70% da energia restante é rejeitado sob a forma de calor, aproximadamente 30% via radiador e de 30% a 40% nos gases de escapamento.

Esta distribuição de energia nos automóveis movidos a motores de combustão interna tem despertado o interesse de cientistas e pesquisadores, no que diz respeito à conservação e reaproveitamento de energia. Existem alguns meios de recuperação da energia desperdiçada em um veículo acionado por Motor de Combustão Interna (MCI), devido às perdas de calor através do sistema de arrefecimento (radiador), sistema de lubrificação, e, principalmente do calor perdido no sistema de gases de escape.

Hoje em dia a recuperação de energia térmica e mecânica tem cada vez mais um papel fundamental no veículo, transformando estas energias em eletricidade para posterior consumo. A Figura 1 ilustra o panorama de distribuição de energia em um veículo, via o diagrama de Sankey.

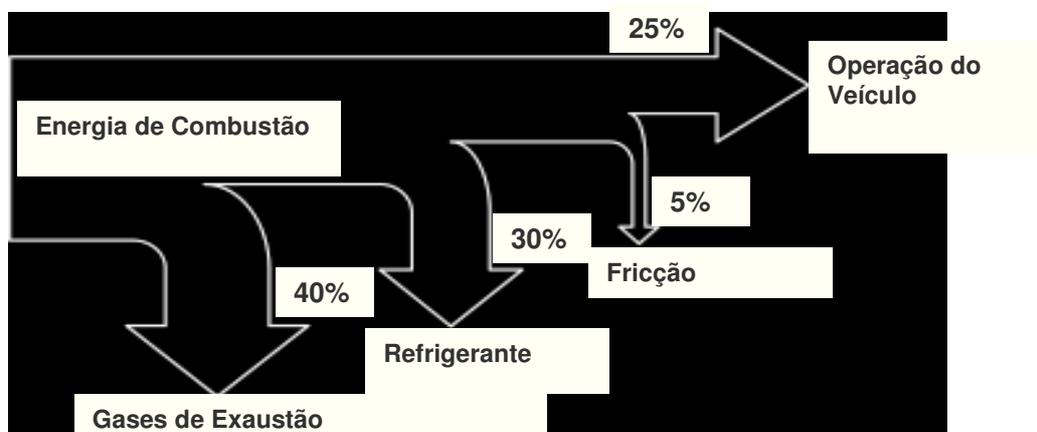


Figura 1 – Diagrama de Sankey da distribuição de energia do combustível no veículo movido a MCI. (Fonte: ZHANG *et al*, 2008)

A Figura 1 permite observar que a energia liberada para o sistema de escape é da mesma ordem de grandeza da potência mecânica fornecida pelo motor. A potência total do sistema de exaustão de gases e arrefecimento do motor é o dobro da potência mecânica de tração aproveitada.

Parte da energia em forma de calor pode ser regenerada em energia elétrica, pela conversão termoelétrica direta, e posteriormente utilizada para o carregamento de baterias de um veículo híbrido, ou simplesmente para limitar a utilização do alternador de um veículo convencional, proporcionando assim um menor consumo de combustível.

A temperatura dos gases de escape de um motor de combustão interna chega a ultrapassar 800°C, quando o veículo se encontra em sua potência máxima (ANTUNES, 2011), estes limites são cuidadosamente trabalhados para que se obtenham temperaturas inferiores aos mesmos com o máximo de aproveitamento da potência térmica, ou seja, obter temperaturas menores para aproveitar este calor, devido ao fato de que os materiais dos módulos termoelétricos utilizados atualmente não suportarem tão altas temperaturas (SANTOS, 2010).

Ao longo dos tempos, os investigadores têm trabalhado para recuperar o calor do escape dos automóveis, utilizando conversores termoelétricos. No entanto, a potência elétrica gerada é reduzida e serve apenas para alimentar alguns componentes elétricos constituintes de um automóvel. Um sistema de aproveitamento de calor em um automóvel pode ser mais eficiente e gerar uma potência superior, quando se aproveitam todas as perdas de calor, como o calor perdido nos sistemas de arrefecimento, de lubrificação e no respectivo escape. Recentemente, os geradores termoelétricos desenvolvidos para o automóvel, utilizando avançados conversores termoelétricos têm uma eficiência na ordem dos 6% (VAZQUEZ, 2002).

As primeiras implementações de geradores termoelétricos de conversão direta em veículos ocorreram em caminhões com motor a diesel. Em 1994 foi desenvolvido um gerador elétrico para um caminhão (FAIRBANKS, 2008), conforme ilustrado na Figura 2.



(a) Local de instalação do gerador

(b) Gerador termoelétrico

**Figura 2 - Caminhão com módulo termoelétrico instalado (a) e o gerador termoelétrico utilizado (b)**

(Fonte: FAIRBANKS, 2008)

Recorrendo a conversores termoelétricos de efeito Seebeck, ligados eletricamente em série, produziu-se então o gerador termoelétrico de conversão direta. Fairbanks (2008) demonstrou que o gerador tem capacidade de produzir uma potência elétrica na ordem de 1kW a partir dos gases de escape, obtendo-se um ganho no respectivo consumo de combustível.

Em 2008 o California Institute of Technology, apresentou algumas soluções e aplicações de geradores termoelétricos em veículos, no âmbito da DEER Conference (FAIRBANKS, 2008). Estes autores começaram por avaliar a energia consumida e desperdiçada no sistema de exaustão de um automóvel. Foi feita a caracterização do sistema e a análise do local de implementação do gerador termoelétrico, para um BMW série 5 com motor a gasolina.

A Figura 3 ilustra o local de implementação do gerador termoelétrico. A energia fornecida por este gerador aproxima-se dos 500W de potência elétrica em condução na cidade e 1kW de máxima potência, ou seja, em auto-estrada. Esta potência pode ser utilizada para alimentar componentes como o GPS, o rádio, ou até mesmo o ar condicionado. Segundo Fairbanks (2008), este gerador termoelétrico tem figura de mérito muito próxima de um, cerca de 12% de eficiência, e uma economia de combustível de aproximadamente 10%.



Figura 3 – Local de instalação do gerador no escapamento. (Fonte: FAIRBANKS, 2008)

Karri *et al* (2011) fizeram previsões de economia de combustível em um veículo SUV utilizando módulos termoelétricos comerciais de Telureto de Bismuto acoplados ao sistema de exaustão de gases. O resultado foi uma economia de combustível da ordem de 2%.

## Capítulo 3 – Fundamentação Teórica

### 3.1 Princípio da Conversão Termoelétrica Direta

A conversão termoelétrica direta encontra-se presente em inúmeros processos industriais e em diversos fenômenos onde o fator temperatura se destaca. Trata-se de uma tecnologia para conversão de energia térmica em energia elétrica por meio de dispositivos de estado sólido. Neste capítulo são apresentados os principais fenômenos e efeitos presentes nos conversores termoelétricos.

Dentre estes fenômenos se destacam o Efeito Joule, Efeito Thomson, Efeito Peltier e o Efeito Seebeck. Os conversores termoelétricos consistem, fundamentalmente, na aplicação dos Efeitos Seebeck e Peltier, sendo o Efeito Seebeck o mais importante para o estudo de geradores termoelétricos.

### 3.2 Efeito Joule

Quando uma corrente elétrica percorre um condutor é gerado calor. A intensidade desse calor é proporcional ao quadrado da intensidade da corrente elétrica e independe do sentido da corrente. O calor de Joule produzido é dado pela Equação 1:

$$Q_J = R \cdot I^2 \quad (1)$$

Onde:

$Q_J$  = Taxa de transferência de calor de Joule gerado [W]

$R$  = Resistência elétrica ( $\Omega$ ) do condutor

$I$  = Corrente elétrica do circuito [A]

A condução térmica resulta do fato que o gradiente de temperatura num material induz o calor a fluir na direção de menor temperatura. A taxa na qual este

calor é conduzido por unidade de área é proporcional ao gradiente da temperatura e é dado pela Equação 2:

$$q = -k. \Delta T \quad (2)$$

Onde:

$q$  = Taxa de condução de calor por unidade de area. [W/m<sup>2</sup>]

$k$  = Condutividade térmica [W / °C.m]

$\Delta T$  = Diferença de temperatura entre os lados do módulo [°C]

### 3.3 Efeito Thomson

De acordo com Alves (1995) este efeito foi descoberto por William Thomson (Lord Kelvin) na década de 1850, e diz que uma quantidade extra de calor  $Q_T$  é liberada ou absorvida por um condutor homogêneo, quando submetido a um gradiente térmico  $\Delta T$  e atravessado por um fluxo de corrente elétrica  $I$ . Este calor depende do sentido do fluxo de corrente elétrica em relação ao sentido do gradiente térmico aplicado, e é definido pela Equação 3:

$$Q_T = \tau. I. \Delta T \quad (3)$$

Onde:

$Q_T$  = Taxa de calor Thomson. [W]

$\tau$  = Coeficiente de Thomson [V / °C]

$I$  = Corrente elétrica no circuito [A]

$\Delta T$  = Diferença de temperatura [°C]

O coeficiente de Thomson ( $\tau$ ) é positivo quando o calor é absorvido pelo material e quando a corrente flui em direção à região de maior temperatura. Logo,  $Q_T > 0$  significa que o calor é absorvido da vizinhança.

### 3.4 Efeito Peltier

Descoberto por Jean Charles Athanase Peltier em 1834, o Efeito Peltier consiste na produção de uma diferença de temperatura quando a junção de dois materiais diferentes é percorrida por uma corrente elétrica. Na junção de dois condutores diferentes é absorvida ou libertada energia térmica, dependendo do sentido da corrente que o percorre, sendo esta energia térmica proporcional a esta corrente. Quando uma corrente elétrica atravessa a junção de dois diferentes condutores, a junção arrefece absorvendo energia térmica do meio onde se encontra. Invertendo o sentido da corrente, a junção aquece provocando um aquecimento do meio onde se encontra através da liberação de energia térmica, este conceito é conhecido como reversibilidade. O calor de Peltier é dado pela Equação 4:

$$Q_P = \pm \pi \cdot I = \pm I \cdot \alpha \cdot T \quad (4)$$

Onde:

$Q_P$  = Taxa de calor Peltier por unidade de area da junção. [W/m<sup>2</sup>]

$\alpha$  = Coeficiente de Seebeck [V / °C]

$T$  = Temperatura absoluta [°C]

$I$  = Corrente elétrica no circuito [A]

$\pi$  = Coeficiente de Peltier [V]

Se o calor é absorvido pelo sistema, a quantidade  $Q_P$  é positiva. A junção quente absorve calor, conforme a Equação 5:

$$Q_h = \alpha \cdot T_h \cdot I \quad (5)$$

A junção fria dissipa calor, conforme a Equação 6:

$$Q_c = \alpha \cdot T_c \cdot I \quad (6)$$

Já quando o calor é dissipado pelo sistema,  $Q_p$  torna-se negativo, e o processo se dá de forma inversa, ou seja, a junção quente dissipa calor, enquanto a junção fria absorve calor.

O calor Peltier é reversível, ou seja, quando se inverte o sentido da corrente, permanecendo constante o seu valor, o calor Peltier é o mesmo, porém de sentido oposto. A demonstração deste tipo de efeito é ilustrada pela Figura 4:

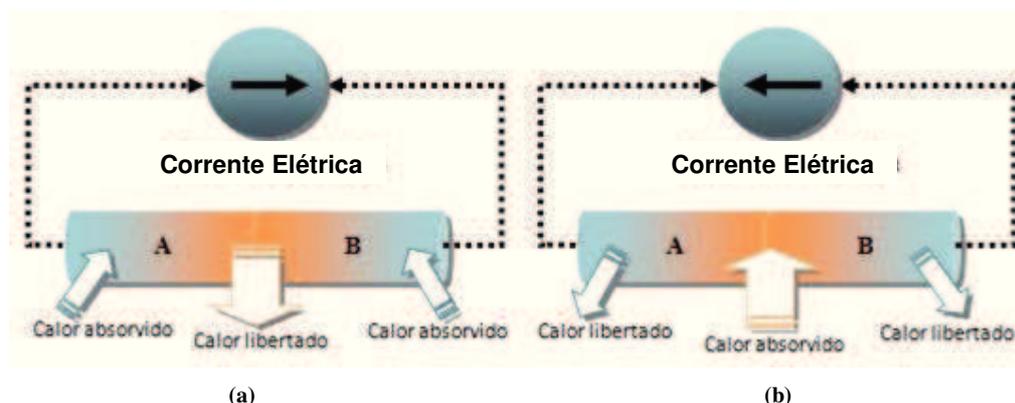


Figura 4 - Demonstração do efeito Peltier para aquecimento (a) e absorção de calor (b)

(Fonte: ANTUNES, 2011)

O efeito Peltier é conseguido através de uma corrente gerada por uma fonte exterior ou pelo seu próprio par termoeletrico. Este efeito termoeletrico é utilizado em diversos setores da eletrônica para o controle de temperatura de componentes e circuitos. No setor industrial, é utilizado em pequenos frigoríficos sem compressor.

A Figura 5 ilustra a exemplificação de dois diferentes materiais com a respectiva passagem da corrente elétrica. O tipo n corresponde a Bismuto, Telúrio, Selênio (Bi, Te, Se) e o tipo p corresponde a Bismuto, Telúrio, Antimônio (Bi, Te, Sb) (Gerovac *et al*, 2002).

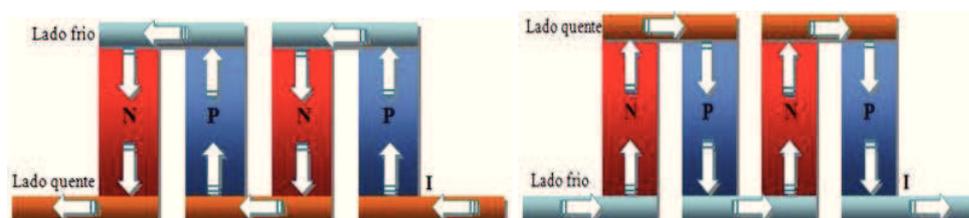


Figura 5 - Aplicação do efeito Peltier com diferentes materiais e representação do sentido da corrente elétrica. (Fonte: GONÇALVES, 2008)

### 3.5 Efeito Seebeck

O Efeito Seebeck foi observado pela primeira vez pelo físico Thomas Johann Seebeck, em 1821. Ao contrário do efeito Peltier, consiste, fundamentalmente, na transferência de elétrons de uma região quente para outra de menor temperatura. Dito em outras palavras, a existência de uma diferença de temperatura num determinado condutor elétrico, produz uma diferença de potencial elétrico ( $\Delta V$ ) [V] e um fluxo de corrente elétrica (quando o circuito é fechado). Este fenômeno encontra-se ilustrado na Figura 6. Os elétrons da região com a temperatura mais elevada (região quente) deslocam-se para a região com menor temperatura (região fria), onde o nível de energia cinética é menor (GONÇALVES, 2008).

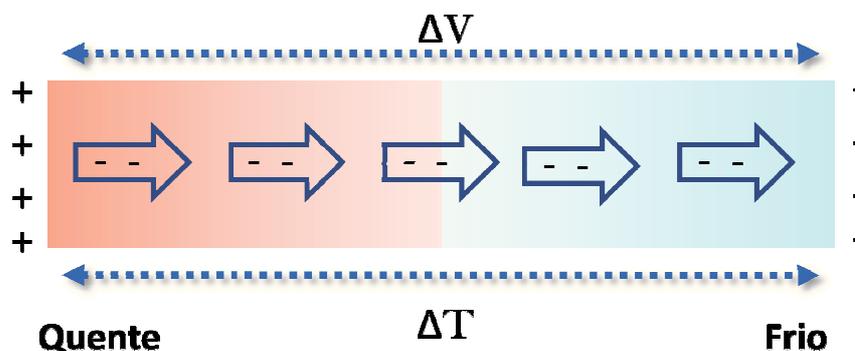


Figura 6 - Princípio do efeito Seebeck: orientação dos elétrons no sentido junção quente–junção fria.

(Fonte: ANTUNES, 2011)

Com base na Figura 6, observa-se que quando um condutor é aquecido numa extremidade e resfriado na outra, os elétrons deslocam-se da região quente para a região fria, fazendo com que haja excesso de íons positivos na região quente e excesso de elétrons na região fria. Nos terminais das extremidades do condutor é gerada uma diferença de potencial ( $\Delta V$ ) na ordem de alguns millivolts (mV), também conhecida por tensão termoelétrica. Essa diferença de potencial por unidade de diferença de temperatura é designada por efeito Seebeck, onde matematicamente é obtido pela Equação 7:

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \text{ (V} \cdot \text{K}^{-1}\text{)} \quad (7)$$

A amplitude dessa diferença de potencial está relacionada com o tipo material dos condutores aplicados e, principalmente, com a diferença de temperatura entre os materiais. Esse fenômeno é o princípio de funcionamento dos termopares, um sensor comumente usado na indústria para monitoramento de temperatura e também como gerador de energia elétrica, conforme a Figura 7.

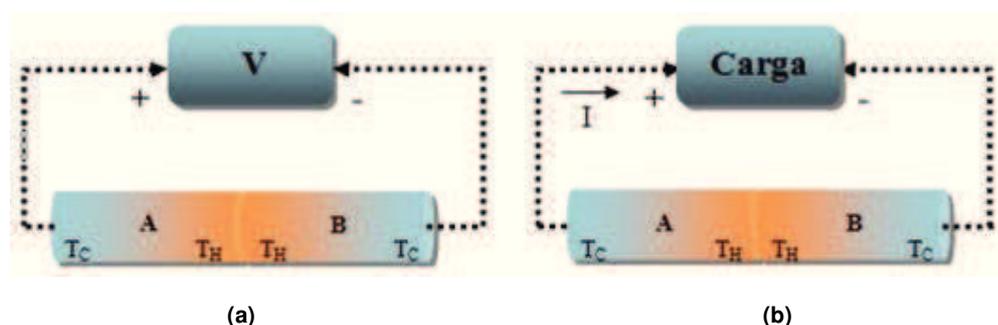


Figura 7 - Efeito Seebeck como sensor de temperatura (a) e como gerador de energia elétrica (b).

(Fonte: ANTUNES, 2011)

### 3.6 Termopar

Um exemplo clássico de aplicação do efeito Seebeck é o termopar. Um termopar é constituído por dois condutores metálicos distintos, de metal puro ou ligas homogêneas. Os dois metais são soldados (fusão por aquecimento) numa extremidade, que se designa por junção quente ou junção de medição. A outra extremidade dos condutores é utilizada para a respectiva medição, designado por junção de referência, fechando assim o circuito elétrico por onde flui a corrente elétrica. O funcionamento dos termopares é um bom exemplo de aplicação do efeito Seebeck, onde a tensão gerada é proporcional à diferença de temperatura entre as extremidades do sensor. A tensão medida nas extremidades de um termopar é obtida através da Equação 8:

$$V = (\alpha_A - \alpha_B)(T_h - T_c) \quad (8)$$

Onde  $\alpha_A$  e  $\alpha_B$  são as constantes Seebeck dos metais e dependem da constituição dos materiais. Duas junções de diferentes metais a diferentes

temperaturas geram uma força eletromotriz (f.e.m.) que é proporcional à diferença de temperatura. A Figura 8 representa a estrutura de um termopar.

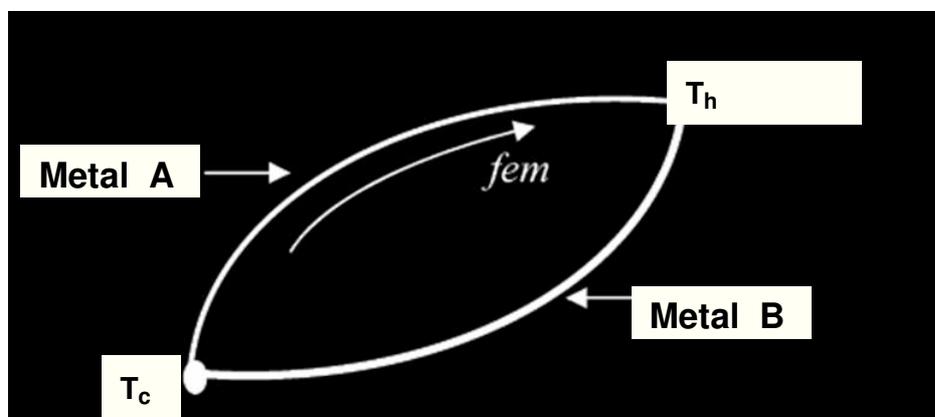


Figura 8 - Termopar com diferentes metais A e B. (Fonte: Adaptado de ALVES, 2007)

Estes sensores medem a diferença de temperatura entre dois pontos, por este motivo é indispensável determinar a temperatura de uma das junções, para saber a diferença de temperatura entre elas.

Estes sensores são muito usados em várias aplicações, principalmente nas indústrias: metalúrgica, metal-mecânica e siderúrgicas onde a medida de temperaturas elevadas é importante. A linearidade, precisão e estabilidade são melhores que um termistor ou uma termoresistência, e uma grande vantagem é a sua área de medida ser muito reduzida. Este trabalho utiliza termopares como instrumentos de medição de temperatura.

### 3.7 Transferência de Calor

Transferência de calor é o processo pelo qual o calor flui de um corpo de alta temperatura para um de temperatura mais baixa. O corpo quente é denominado fonte quente e o corpo frio fonte fria, ou receptor. Naturalmente, a transmissão de calor se dá da fonte quente para a fonte fria, e são três os modos de transmissão: condução, convecção e radiação, muito embora nos processos de troca térmica quase sempre ocorre a combinação de dois ou três destes modos. É possível identificar processos de transferência de calor em termos de equações e taxas apropriadas (INCROPERA *et al*, 2008).

Está implícito, na definição acima, que um corpo nunca contém calor, mas o calor é identificado como tal quando cruza a fronteira do sistema. O calor é, portanto, um fenômeno transitório, que cessa quando não existe mais diferença de temperatura.

Para aplicação prática dos efeitos Seebeck e Peltier o experimento utiliza os três modos de transferência de calor.

A condução pode ser definida como o processo pelo qual a energia é transferida de uma região de alta temperatura para outra de temperatura mais baixa dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes de contato direto. Estes mecanismos podem ser visualizados como a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas de uma substância devido a interações entre elas.

Para a condução térmica, a Equação 9 é conhecida como Lei de Fourier, e é utilizada para se obter fluxo de calor transferido por condução através de uma parede unidimensional, de acordo com INCROPERA *et al* (2008).

$$\dot{Q} = -\kappa \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

Onde:

$\dot{Q}$  = Fluxo de calor por condução [W]

$\kappa$  = Condutividade térmica do material [W/m.K]

A = Área de seção transversal material [m<sup>2</sup>]

dT = Gradiente de temperatura [K]

dx = Comprimento do trajeto do calor [m]

A condutividade térmica ( $\kappa$ ) é uma propriedade física dos materiais que mede a capacidade de transferir calor através da sua seção. É definida como a potência térmica transferida por unidade de área ao longo de uma espessura unitária sujeita a uma diferença de temperatura unitária (W/m.K). A Tabela 1 apresenta a condutividade térmica para diferentes materiais.

**Tabela 1 - Materiais e respectiva condutividade térmica.**

(Fonte: Adaptado de ANTUNES, 2011 e ALVES, 2007)

Material	Condutividade Térmica k (W/m.K)
Prata	426
Cobre	398
Alumínio	237
Tungstênio	178
Ferro	80,3
Vidro	0,72 - 0,86
Água	0,61
Tijolo	0,4 - 0,8
Madeira (pinho)	0,11 - 0,14
Fibra de Vidro	0,046
Espuma de Poliestireno	0,033
Ar	0,026
Telureto de Bismuto	1,8

A transferência de calor por convecção ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície, quando os dois se encontram a diferentes temperaturas. A transferência acontece tanto pelo movimento molecular aleatório quanto pelo movimento global do fluido. Ela pode ser natural (livre) ou forçada, dependendo das condições de escoamento do fluido.

A Equação 10 é utilizada para se obter a quantidade do fluxo de calor transferido por convecção, independente do processo de convecção, de acordo com INCROPERA *et al* (2008).

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (10)$$

Onde:

$\dot{Q}$  = Fluxo de calor transferido por convecção [W]

$h$  = coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m<sup>2</sup>K]

$A$  = Área de transferência de calor [m<sup>2</sup>]

$\Delta T$  = Diferença de temperatura entre a superfície e o líquido [K]

### 3.8 Dissipadores de Calor

Nos últimos 50 anos a refrigeração e gerenciamento térmico de sistemas eletro-eletrônicos têm tido um papel importante no que diz respeito a aumentos de potência, enquanto mantêm a temperaturas de componentes em níveis satisfatórios (OJHA, 2009). A refrigeração de componentes eletrônicos, principalmente dos fabricados a partir de materiais semicondutores tem sido um desafio para o desenvolvimento tecnológico. Os elementos semicondutores são a base da eletrônica moderna, como por exemplos os diodos, transistores, memórias e microprocessadores. Tais elementos atingem temperaturas elevadas quando em operação e possuem um limite de temperatura de trabalho, onde, acima deste valor, os componentes podem sofrer alterações na sua funcionalidade e até mesmo na sua integralidade.

Existem vários métodos de refrigeração de componentes eletrônicos, porém o mais comum é utilizando dissipadores de calor, que são dispositivos que absorvem e dissipam calor de um outro componente por meio de contato térmico direto (condução) e convecção. Os dissipadores de calor são fabricados de materiais com boa capacidade de condução térmica como o cobre (401 W/mK a 300 K) e ligas de alumínio (237 W/mK a 300 K), segundo Ojha (2009).

Uma outra característica importante dos dissipadores de calor, segundo Souza (2007), é a utilização de superfícies estendidas, ou aletadas, o que implica no aumento da área superficial e, por conseguinte, no aumento da transferência de calor entre a estrutura e o fluido adjacente. Por causa desse princípio que a aplicação de superfícies estendidas se faz de maneira ampla na indústria de aparelhos elétricos e eletrônicos que produzem calor, e que necessita ser eficientemente dissipado. Na superfície estendida, ocorre transferência de calor por condução no interior do sólido e transferência de calor por convecção na superfície das aletas, a Figura 9 ilustra diferentes tipos de dissipadores.



Figura 9 - Dissipadores de calor de várias geometrias. (Fonte: [www.micforg.co.jp](http://www.micforg.co.jp) em 26/04/12)

A melhoria de troca térmica pode ser obtida aumentando-se a velocidade do fluido que escoa pelas aletas por meio de um ventilador (ventoinha) ou qualquer dispositivo que implique em uma ventilação forçada, conforme figura 10, ou ainda por meio de um fluido líquido.

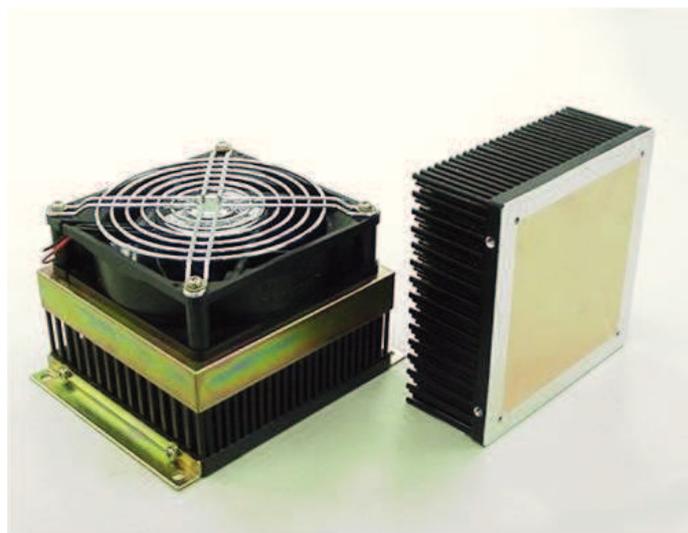


Figura 10 - Dissipador resfriado com ventilação forçada. (Fonte: [www.micforg.co.jp](http://www.micforg.co.jp) em 26/04/12)

Em cada aplicação, a preocupação principal está em definir que tipo de aleta dará a maior eficiência de refrigeração, mínimo custo de material, peso, tamanho, mínima resistência para refrigeração pelo fluxo ambiente, capacidade adequada e fácil fabricação. A eficiência do dissipador de calor é medida pelo desempenho térmico gerado por volume. Um dissipador de calor eficiente fornecerá refrigeração substancial ao ocupar um volume físico pequeno.

Os módulos termoelétricos são componentes semicondutores e produzem uma grande quantidade de calor por área, além de possuírem limitações no que diz respeito às altas temperaturas. Desta forma, se faz indispensável o uso de dissipadores de calor com ventilação forçada nos sistemas termoelétricos, com o objetivo de manter as placas numa temperatura dentro dos valores recomendados pelo fabricante e aumentar a diferença de temperatura entre as faces quente e fria dos módulos, aumentando, conseqüentemente, a eficiência do gerador ou refrigerador termoelétrico.

### 3.9 Módulos Termoelétricos

Um módulo termoelétrico ou célula termoelétrica de efeito Seebeck/Peltier, é, como o próprio nome indica, baseado nestes efeitos. É amplamente utilizado em aplicações de arrefecimento ou aquecimento onde o seu reduzido tamanho, a sua simples implementação, a vantagem de não necessitar de manutenção e o seu elevado tempo de vida, prevalecem sobre outros conversores como, por exemplo, evaporadores, condensadores ou compressores. Estes módulos são muito utilizados em pequenos frigoríficos portáteis, em equipamentos de laboratório, no arrefecimento de processadores para aumentar o seu desempenho, adegas climatizadas (STRAZZA, 2008), entre várias aplicações. A Figura 11 ilustra um esboço construtivo de um conversor termoelétrico convencional e a Figura 12 ilustra um conversor comercial.

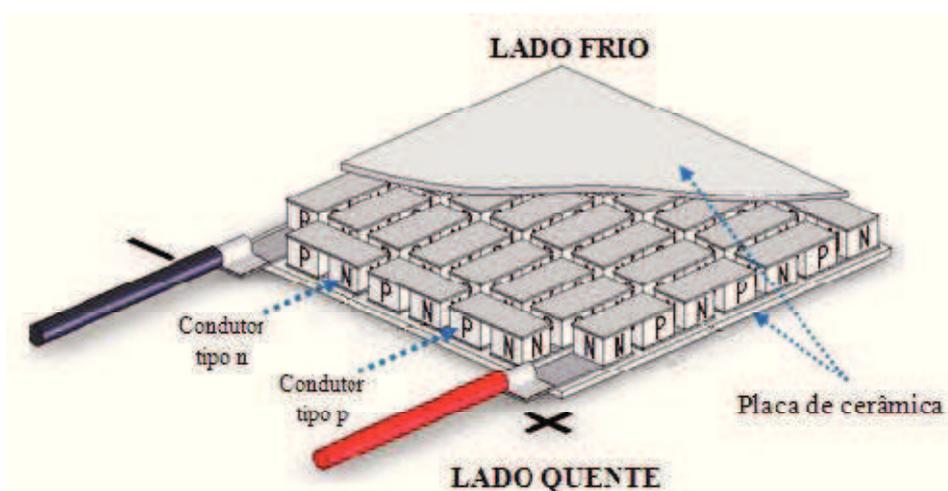


Figura 11 - Esboço construtivo de um módulo termoelétrico. (Fonte: Adaptado de [www.kryotherm.ru](http://www.kryotherm.ru) em 26/04/2012)

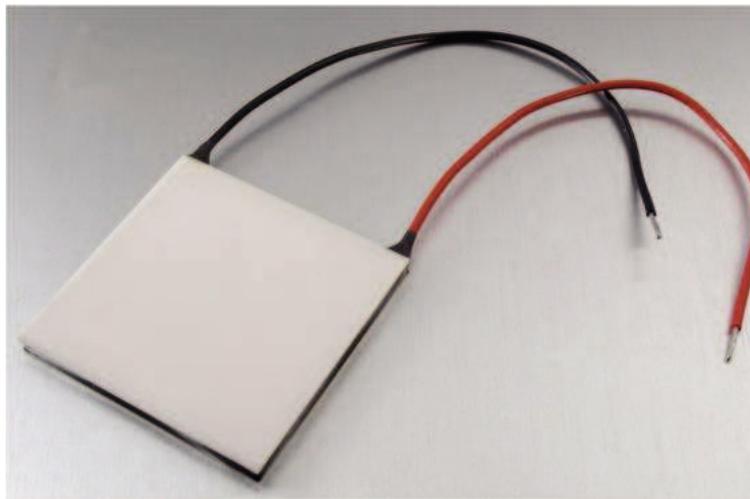


Figura 12 - Módulo termoelétrico comercial. (Fonte: [www.kryotherm.ru](http://www.kryotherm.ru) em 26/04/2012)

A sua composição é feita por junções de materiais do tipo p e do tipo n de Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), também chamados de termo-elementos, (SANTOS, 2010) ligados eletricamente em série por junções metálicas e termicamente em paralelo, como ilustra a Figura 11. Quando é percorrida por uma corrente elétrica, esta entra pelo terminal (+), percorre todos os elementos em série e sai pelo outro terminal (-). Os pares térmicos encontram-se colocados entre duas placas de cerâmica planas a base do óxido ou nitrato de alumínio que são utilizados para o contato térmico do módulo ao restante do sistema.

O princípio de funcionamento destes módulos baseia-se nos efeitos Seebeck e Peltier. No efeito Peltier, quando uma corrente percorre num sentido, uma das faces vai irradiar e a outra absorver calor. Quando essa corrente percorre no sentido contrário, as faces irradiadoras e absorvedoras de calor se invertem. Para uma boa eficácia, ambas as faces devem estar bem isoladas entre si. No funcionamento como geradores termoelétricos é utilizado o efeito Seebeck, onde a energia elétrica é gerada através de diferença de temperatura entre as faces.

### 3.10 Figura de Mérito

A figura de mérito caracteriza o desempenho de um conversor, ou seja, consiste numa medida de desempenho dos materiais termoelétricos, sendo

representada por  $Z$ , e relaciona os efeitos Seebeck ( $\alpha$ ), a resistividade elétrica ( $\rho$ ) e a condutividade térmica ( $\kappa$ ) de um módulo termoelétrico, matematicamente é obtida pela Equação 11:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \kappa} \quad (11)$$

Este parâmetro mostra que quanto maior a resistividade elétrica e a condutividade térmica do material, maior é o aquecimento por efeito Joule e pior a figura de mérito. As variáveis  $\kappa$  e  $\rho$  representam o cálculo equivalente de todas as condutâncias térmicas e resistências elétricas do módulo (ANTUNES, 2011).

A figura de mérito também pode ser expressa na forma adimensional com  $ZT$ , onde o material é caracterizado para uma determinada temperatura (SINGH *et al*, 2011), conforme a Equação 12.

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \kappa} T \quad (12)$$

Um bom material termoelétrico deve trabalhar com uma grande faixa de temperatura, alto coeficiente de Seebeck, e baixa resistividade elétrica e condutividade térmica, tendo como consequência uma elevada figura de mérito (LEE *et al*, 2010). No início da década de 1930 até o final dos anos de 1970, houve um surto de descobertas mostrando que materiais semicondutores exibiam as melhores propriedades termoelétricas (ALVES, 2007), e por consequência, maiores figuras de mérito.

A busca por materiais mais eficientes para fabricação de módulos termoelétricos vem crescendo ao longo dos anos. A Figura de Mérito ( $ZT$ ) tem aumentado, porém, ainda tem um valor muito reduzido ( $ZT=1$  à temperatura ambiente). A Tabela 2 apresenta alguns materiais que compõem módulos termoelétricos existentes (GONÇALVES, 2008).

Tabela 2 - Propriedades termoelétricas de diferentes materiais. (Fonte: ANTUNES, 2011)

Material	Símbolo	Coef. Seebeck $\alpha$ ( $\mu\text{VK}^{-1}$ )	Resistividade $\rho$ ( $\mu\Omega\text{m}$ )	Cond. Térmica $k(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$	Figura de Mérito ZT (300K)
Níquel	Ni	-18	0,07	91	0,015
Cromo	Cr	18	0,13	94	0,008
Bismuto	Bi	-60	1,15	8,4	0,11
Antimônio	Sb	40	0,42	18,5	0,062
Telureto de Bismuto	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	-240	10	2,02	0,86
Telureto de Antimônio	$\text{Sb}_2\text{Te}_3$	92	3,23	1,63	0,48

Em temperatura ambiente, os compostos de Telúrio (Te), Bismuto (Bi) e Antimônio (Sb), são materiais semicondutores que apresentam a maior figura de mérito. Estes materiais podem alcançar elevados valores de ZT devido à sua estrutura incomum, uma supercompactação formada por camadas alternadas de semicondutores (SOUZA, 2007).

De acordo com Sark (2011), em temperaturas entre 600K e 800K são utilizadas ligas de PbTe, já em altas temperaturas (800K-1300K) as ligas de silício e germânio. As ligas de Telureto de Bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) são as mais empregadas em baixas temperaturas (200K-400K) e também as mais comumente empregadas na fabricação de módulos termoelétricos comerciais.

### 3.11 Modelamento Matemático do Gerador Termoelétrico

Uma das principais aplicações dos módulos termoelétricos é a geração de energia elétrica. Quando os módulos termoelétricos funcionam como geradores, estão utilizando como fundamento o efeito Seebeck, produzindo energia elétrica através de diferenças de temperatura. Como ilustra a Figura 13, quando o calor é aplicado na junção dos elementos semicondutores, os elétrons livres do elemento tipo N e as “lacunas” dos elementos tipo P deslocam-se para o lado frio, concentrando carga neste local. A extremidade fria do elemento tipo N adquire polaridade negativa (excesso de elétrons) e a extremidade fria do elemento tipo P adquire carga positiva (excesso de lacunas), ao se fechar o circuito entre os elementos N e P cria-se uma corrente elétrica no sistema.

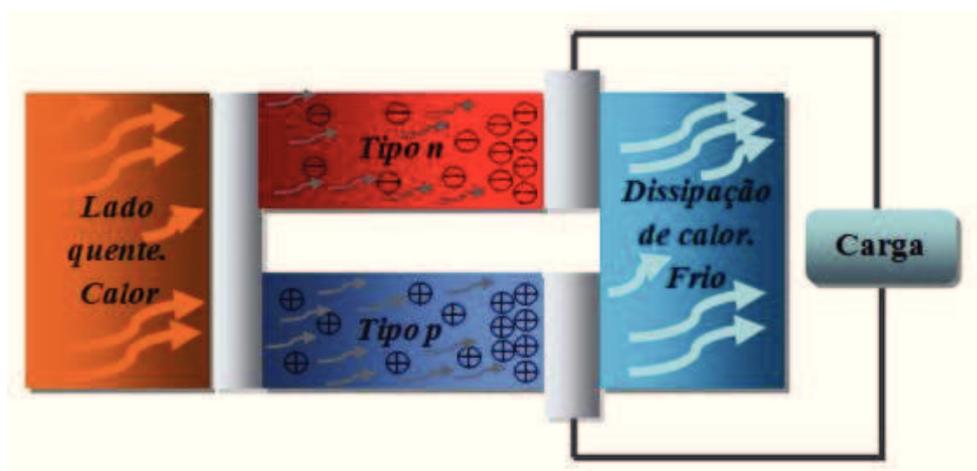


Figura 13 - Funcionamento de um módulo termoelétrico como gerador. (Fonte: ANTUNES, 2011)

A diferença de potencial (d.d.p) gerada é proporcional à diferença de temperatura entre a face quente e a de menor temperatura (fria) à qual o módulo é submetido. Cada junção p-n produz uma tensão na ordem de millivolts (mV), sendo a tensão total multiplicada pelo número de junções (N), conforme apresentado pela Equação 13:

$$V_i = N \cdot (T_h - T_c) \cdot (\alpha_p - \alpha_n) \quad (13)$$

Onde:

$\Delta T = T_h - T_c$ , é a diferença de temperatura entre as junções.  $T_h$  é a temperatura no lado quente e  $T_c$  no lado frio.

$\alpha = \alpha_p - \alpha_n$ , é o coeficiente de Seebeck, expresso em  $V/^\circ C$ , onde  $\alpha_p$  e  $\alpha_n$  são propriedades dos materiais dos condutores do módulo.

Desta forma, tem-se que a diferença de potencial para o módulo como um todo será dada pela Equação 14, onde  $\alpha$  é o coeficiente Seebeck global do módulo.

$$V_i = \alpha \cdot \Delta T \quad (14)$$

A Figura 14 representa o circuito elétrico equivalente de um módulo termoelétrico onde  $V_i$  é a tensão gerada (mV),  $R_i$  é resistência interna do módulo e  $V_0$  é a tensão nos terminais do módulo.

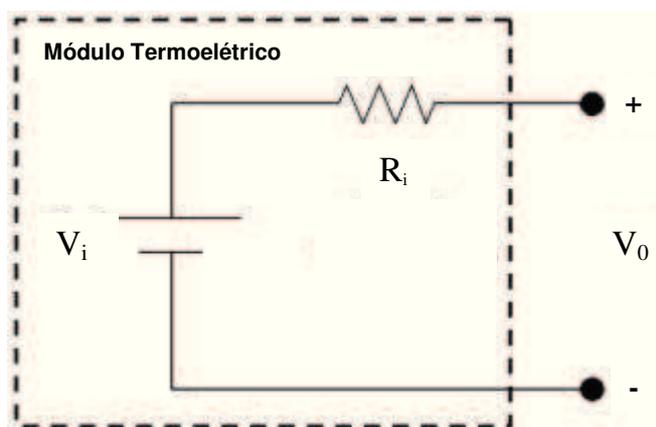


Figura 14 - Circuito elétrico correspondente de um módulo termoelétrico convencional.

(Fonte: Adaptado de SANTOS, 2010)

Enquanto nenhuma carga é ligada aos terminais do módulo, não haverá nenhuma corrente elétrica circulando pelo circuito, portanto  $V_R = 0$  então,  $V_i = V_0$ .

Quando conectamos uma carga ( $R_L$ ) ao circuito, conforme ilustrado pela Figura 15, podemos determinar a corrente ( $I_L$ ) que flui pelo mesmo por meio da Equação 15.

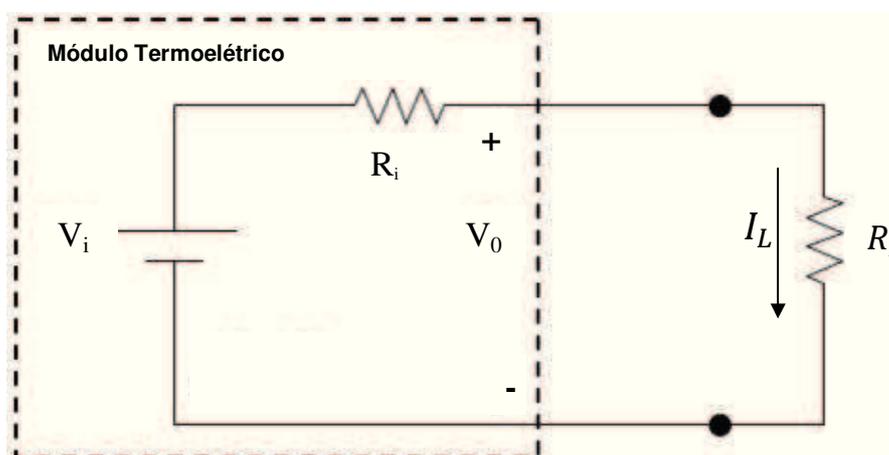


Figura 15 - Circuito elétrico correspondente de um módulo termoelétrico, com carga conectada.

(Fonte: Adaptado de SANTOS, 2010)

$$I_L = \frac{V_i}{(R_i + R_L)} \quad (15)$$

Conseqüentemente a tensão na carga ( $V_L$ ) pode ser definida como a tensão gerada menos a queda de tensão interna do módulo, conforme apresentado na Equação 16:

$$V_L = I_L \cdot R_L = V_i - I_L \cdot R_i \quad (16)$$

Podemos reescrever a Equação 16 em termos da diferença de temperatura e do coeficiente Seebeck, substituindo  $I_L$  pela Equação 15 e  $V_i$  pela Equação 14. Assim temos a Equação 17:

$$V_L = \alpha \cdot \Delta T - \frac{\alpha \cdot \Delta T}{(R_i + R_L)} R_i \quad (17)$$

A potência dissipada na carga é dada pela Equação 18:

$$P_L = I_L^2 \cdot R_L \quad (18)$$

Substituindo a Equação 15 na Equação 18, temos a potência gerada em função da tensão gerada, resistência da carga e resistência interna do módulo, que é expressa pela Equação 19:

$$P_L = \frac{V_i^2 R_L}{(R_i + R_L)^2} \quad (19)$$

Substituindo a Equação 14 na Equação 19, podemos expressar a potência dissipada na carga em função da diferença de temperatura entre as faces do módulo, conforme mostra a Equação 20:

$$P_L = \frac{\alpha^2 \Delta T^2 R_L}{(R_i + R_L)^2} \quad (20)$$

### 3.12 Potência Máxima de Saída

Matematicamente, a potência máxima na carga ( $P_{m\acute{a}x}$ ) é obtida onde a derivada da potência em relação à resistência da carga é igual a zero (SANTOS, 2010). Derivando-se a Equação 19 em função de  $R_L$  e igualando a zero, temos a Equação 21:

$$\frac{V_i^2 \cdot (R_i + R_L) - 2 \cdot R_L \cdot V_i^2}{(R_i + R_L)^2} = 0 \quad (21)$$

Desenvolvendo a Equação 21, concluímos que  $R_i = R_L$ . Assim, potência máxima de saída ( $P_{m\acute{a}x}$ ) é obtida à plena carga, ou seja, quando a resistência interna do conversor ( $R_i$ ) é igual à resistência da carga ( $R_L$ ). Segundo Antunes (2011), a resistência interna de um conversor é obtida pela soma algébrica das resistências térmicas internas do material metálico da junção, a soma das junções p-n e a resistência térmica dos contatos físicos.

Fazendo  $R_i = R_L = R_{m\acute{a}x.pot.}$  e substituindo na Equação 20, obtemos a potência máxima em função da diferença de temperatura, conforme expresso pela Equação 22.

$$P_{m\acute{a}x.} = \frac{\Delta T^2 \cdot \alpha^2}{4 \cdot R_{m\acute{a}x.pot.}} \quad (22)$$

### 3.13 Rendimento

O desempenho de um módulo termoelétrico pode ser caracterizado pelo efeito Seebeck ( $\alpha$ ), pela resistência interna ( $R_i$ ) e pela condutância térmica ( $K$ ) (HSIAO *et al*, 2010).

A condutância térmica do conversor é dada em função da condutância térmica de cada junção p-n. Cada junção contém uma determinada área ( $S$ ), uma condutividade térmica ( $\kappa$ ) e um comprimento ( $l$ ). Como os elementos p-n têm iguais volumes a condutância térmica é igual para ambos, podendo ser expressa pela Equação 23.

$$K = 2 \cdot \frac{\kappa \cdot S}{l} \quad (23)$$

De acordo com Hsiao *et al* (2010), as taxas calor recebido ( $Q_h$ ) e calor removido ( $Q_c$ ) podem ser calculadas pelas Equações 24 e 25.

$$Q_h = \alpha \cdot I_L \cdot T_h + K \cdot (T_h - T_c) - \frac{1}{2} I_L^2 \cdot R_i \quad (24)$$

$$Q_c = \alpha \cdot I_L \cdot T_c + K \cdot (T_h - T_c) + \frac{1}{2} I_L^2 \cdot R_i \quad (25)$$

Onde:

$\alpha \cdot I_L \cdot T_h$  = Calor referente ao Efeito Peltier

$I_L^2 \cdot R_i$  = Potência dissipada

$K \cdot (T_h - T_c)$  = Bombeamento de calor entre dois reservatórios térmicos

A eficiência térmica ou o rendimento é obtido através da relação da potência elétrica de saída ( $P_L$ ) com a potência de entrada, potência térmica ( $q$ ), conforme a Equação 26.

$$\eta = \frac{P_L}{Q_h} \quad (26)$$

De acordo com Phillips (2009)  $Q_h$  pode ser definido como o calor transferido através do módulo e é dado pela Equação de Fourier (9) utilizada para se obter fluxo de calor transferido por condução. A expressão que calcula o rendimento, é definida pela Equação 27, onde  $dx$  é a espessura do módulo.

$$\eta = \frac{I_L^2 \cdot R_L \cdot dx}{k \cdot A \cdot \Delta T} \quad (27)$$

Substituindo o termo  $I_L^2 \cdot R_L$  da Equação 27 pela Equação 20, temos o rendimento em função da diferença de temperatura entre as faces do módulo, expresso pela Equação 28.

$$\eta = \frac{\alpha^2 \cdot \Delta T \cdot dx}{k \cdot A \cdot (R_L + R_i)^2} \quad (28)$$

## Capítulo 4 - Testes

### 4.1 Metodologia

De forma a validar o modelo matemático apresentado no capítulo 3 e com o objetivo de avaliar o desempenho de um gerador termoelétrico e a influência de suas principais variáveis, foi montado um protótipo de um sistema gerador termoelétrico baseado no esquema representativo teórico ilustrado pela Figura 16.

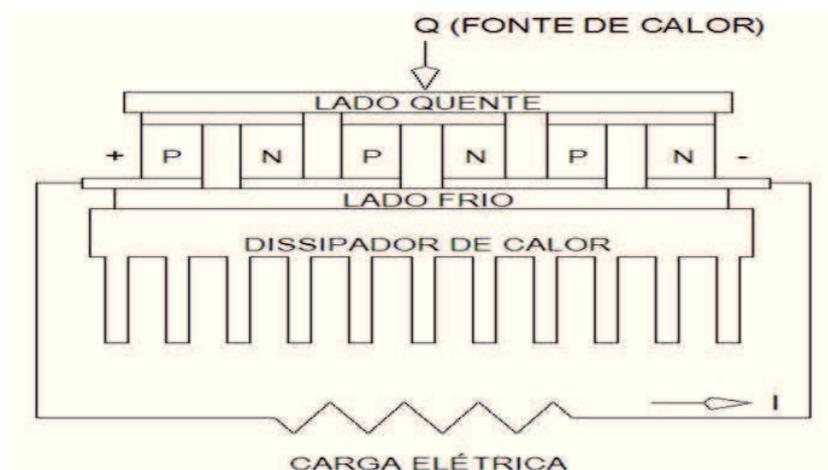


Figura 16 - Esquema representativo teórico de um gerador termoelétrico.

(Fonte: CAMARGO *et al*, 2008)

No modelo experimental a fonte de calor (Q) é o calor de exaustão dos gases de um motor a combustão interna e a carga é uma resistência elétrica. Devido às limitações de temperatura do módulo termoelétrico utilizado na realização dos testes, antes da construção do protótipo do sistema de geração foi montada uma bancada para determinar a distância mínima do módulo em relação ao tubo de escapamento de forma a aproveitar ao máximo o calor rejeitado sem que o módulo seja danificado. Após esta determinação foi montado o protótipo experimental completo.

Com este protótipo é possível monitorar as principais variáveis da geração termoelétrica, como as temperaturas do lado quente e do lado frio do módulo

termoelétrico, a tensão gerada pelo sistema, bem como a corrente na carga resistiva. Com esses dados é possível obter e analisar o desempenho do sistema.

## 4.2 Testes para determinação da altura do módulo

O módulo termoelétrico utilizado para realização dos ensaios é o modelo TE *Technology* 40mm x 40mm x 3,9mm. A temperatura máxima recomendada pelo fabricante é de 180°C, e a temperatura no tubo de escapamento do motor utilizado, ilustrado pela Figura 17, atinge temperaturas muito elevadas, dependendo do regime de trabalho do motor.

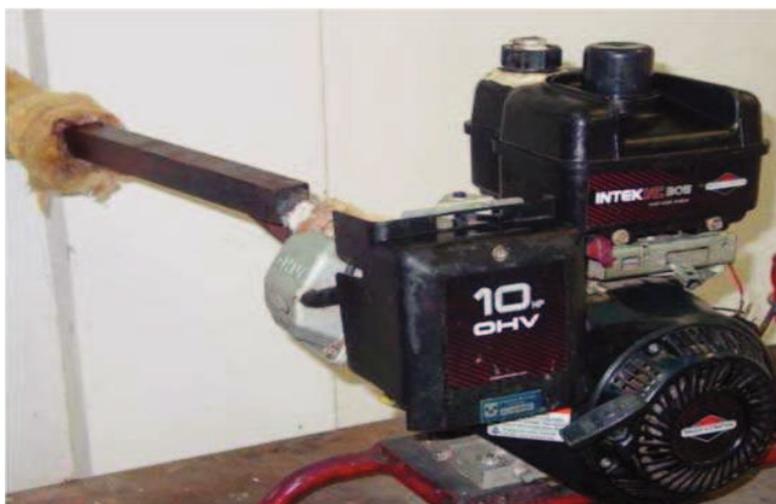


Figura 17 - Motor a combustão modelo Intek I/CR OHV, 10HP. (Fonte: CAMARGO *et al*, 2008)

Para determinação da altura mínima do módulo em relação ao tubo do escapamento do motor foi montada uma bancada conforme a Figura 18, utilizando-se os seguintes equipamentos:

- 1- Motor 2 tempos modelo IntekT I/CR OHV, 10 HP;
- 2- Termopares Tipo J – Sensor Termoelemento Fe-Co, modelo TE/AA;
- 3- Suporte de ferro com altura regulável;
- 4- Dissipador de calor em alumínio, com 20 aletas e espaçamento entre aletas de 10 mm.

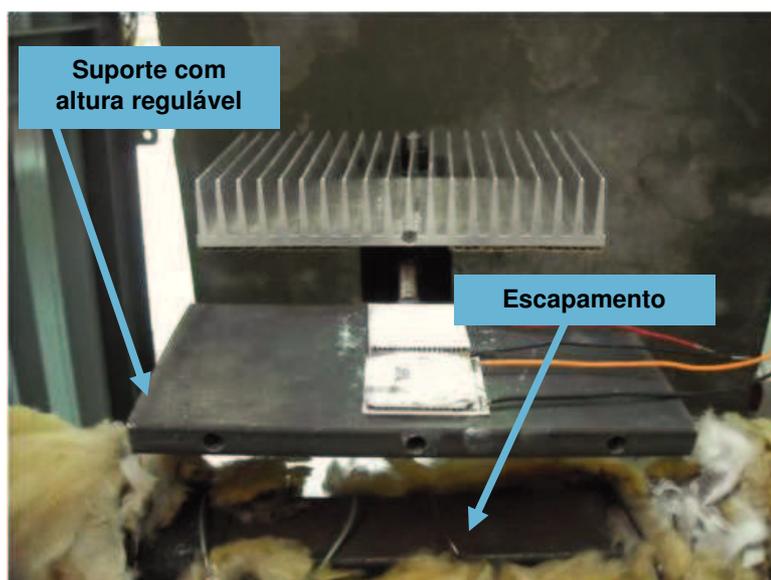


Figura 18 - Bancada experimental para determinação da altura do suporte. (Fonte: Autor)

A fim de determinar a altura ideal para instalação dos módulos termoeletrônicos foram realizadas medições de temperatura no lado quente ( $T_h$ ) e medições de temperatura do lado frio ( $T_c$ ) em função do tempo para diferentes distâncias ( $d$ ) do suporte em relação ao tubo de exaustão de gases. A Figura 19 ilustra os locais onde foram medidas as temperaturas.

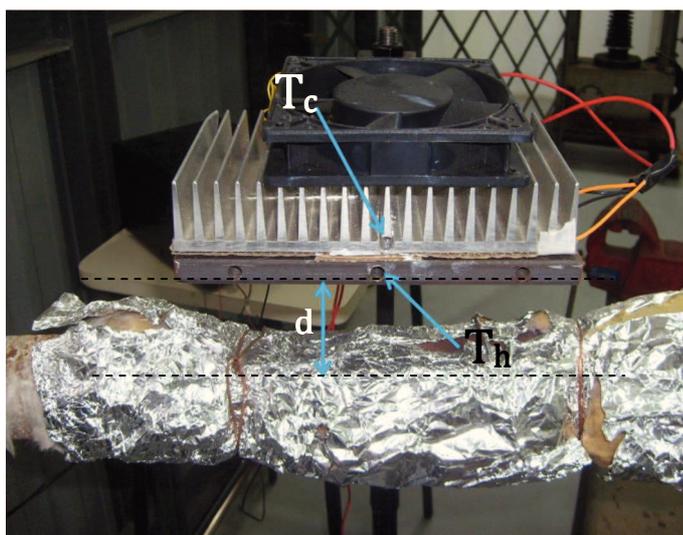


Figura 19 - Medições de temperatura no lado quente ( $T_h$ ) e frio ( $T_c$ ). (Fonte: Autor)

Foram feitas medições de temperatura a cada dois minutos para três diferentes distâncias entre o suporte e o escapamento, 5mm, 10mm e 15mm.

### 4.3 Montagem do sistema de geração

Após a determinação da melhor distância entre o suporte e o tubo de escapamento foi construído um protótipo para realização dos ensaios relativos à geração elétrica. A Figura 22 ilustra um sistema de geração termoelétrica por conversão direta que é composto por módulos termoelétricos conectados em série, montados sobre um suporte de ferro com altura regulável, uma fonte de calor, um dispositivo dissipador de calor, um sistema de ventilação e uma carga resistiva (resistência elétrica), através da qual é possível mensurar o valor da corrente elétrica e conseqüentemente da potência gerada pelo sistema.

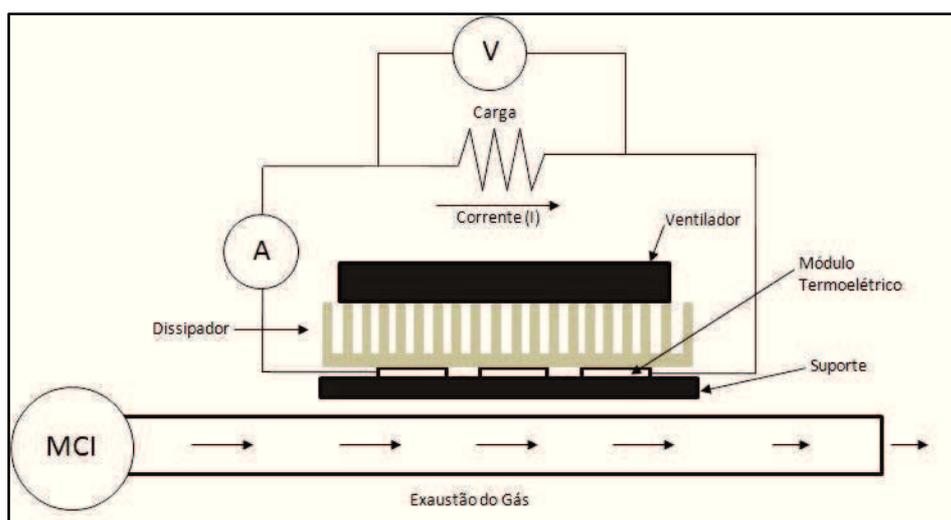


Figura 20 - Esquema de um sistema de geração termoelétrica com carga resistiva. (Fonte: Autor)

O protótipo construído para a realização dos ensaios é composto dos seguintes componentes:

- 1- Ventilador com potência e vazão de ar variáveis;
- 2- Dissipador Lado Frio em alumínio, com 20 aletas e espaçamento entre aletas de 10 mm;
- 3- Módulos Termoelétricos TE Technology 40mm x 40mm x 3,9mm;

- 4- Termopares Tipo J – Sensor Termoelemento Fe-Co, modelo TE/AA (medição de temperatura);
- 5- Motor 2 tempos modelo IntekT I/CR OHV, 10 HP;
- 6- Multímetros “Minipa ET-1502 and ET-2052”. (medição de corrente e tensão);
- 7- Resistência elétrica (5,7 $\Omega$ ).

Para realização dos testes foi usado um motor 2 tempos de 10 HP de potência ilustrado pela Figura 17. Neste protótipo os módulos termoeletrônicos não são colocados em contato direto com a fonte de calor (escapamento do motor) devido sua limitação de temperatura (180°C).

Sobre os módulos foi instalado um dissipador de calor, cujo objetivo é mantê-los numa temperatura dentro dos valores recomendados pelo fabricante (dados do manual técnico) e garantir um diferença de temperatura entre as faces quente e fria dos módulos. Além do dissipador, existe também um ventilador (fonte de ar frio) que é o responsável por melhorar as trocas de calor por convecção, aumentando ainda mais o  $\Delta T$  entre as faces.

No terminal de saída dos módulos conectados em série foi conectada uma resistência de 5,7  $\Omega$ .

Para determinação das variáveis de temperatura foram utilizados termopares, sendo um instalado no suporte de ferro para determinar a temperatura da face quente do módulo ( $T_h$ ) e outro instalado dissipador de calor para determinação da temperatura da face fria ( $T_c$ ). Para medição das variáveis elétricas foi colocado um amperímetro em série com a carga resistiva para medição de corrente (I) e um voltímetro em paralelo para medição de tensão (V).

Foram utilizados dois módulos do fabricante TE Technology, cujas especificações se encontram na Tabela 3.

**Tabela 3 - Especificações do Módulo TE Technology 40mm x 40mm x 3,9mm (Fonte: [www.tetech.com](http://www.tetech.com))**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
<i>Figura de Mérito</i>	<i>0,00268 1/K</i>
<i>Condutância Térmica</i>	<i>0,46 W/K</i>
<i>Condutividade Térmica</i>	<i>0,151 W/°Cm</i>
<i>Resistividade Elétrica</i>	<i>0,00101Ωcm</i>
<i>Número de Associações</i>	<i>127</i>
<i>Resistência Total</i>	<i>2,12Ω</i>

Foram realizados cinco ensaios, e o intervalo entre as medições em cada ensaio foi de cinco minutos.

## Capítulo 5 – Resultados e Discussões

Foram traçados os gráficos da temperatura da face quente em função do tempo e da diferença de temperatura entre as faces em função do tempo para três distâncias diferentes entre o suporte e o escapamento.

O gráfico da temperatura da face quente ( $T_h$ ) em função do tempo para cada distância é ilustrado pela Figura 20.

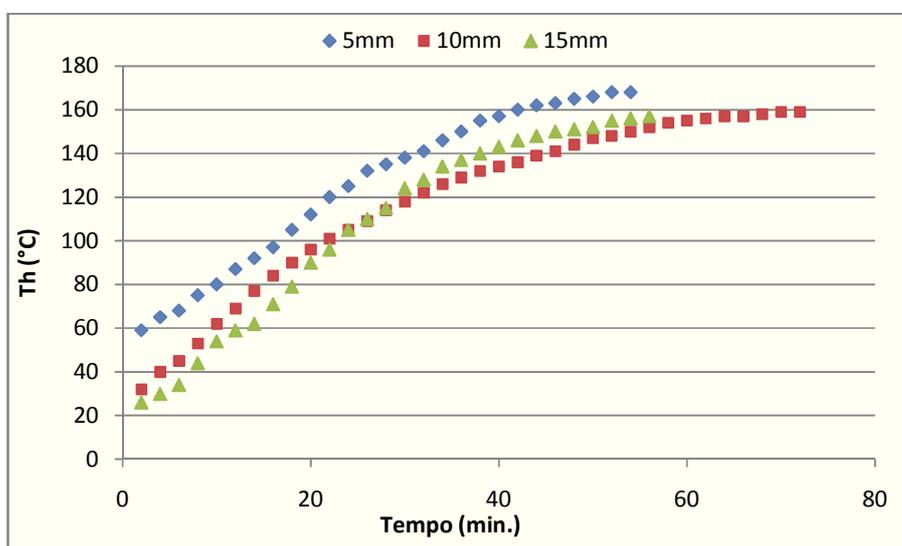


Figura 21 - Temperatura do lado quente ( $T_h$ ) x Tempo para diferentes distâncias ( $d$ ). (Fonte: Autor)

O gráfico da diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) em função do tempo é ilustrado pela Figura 21.

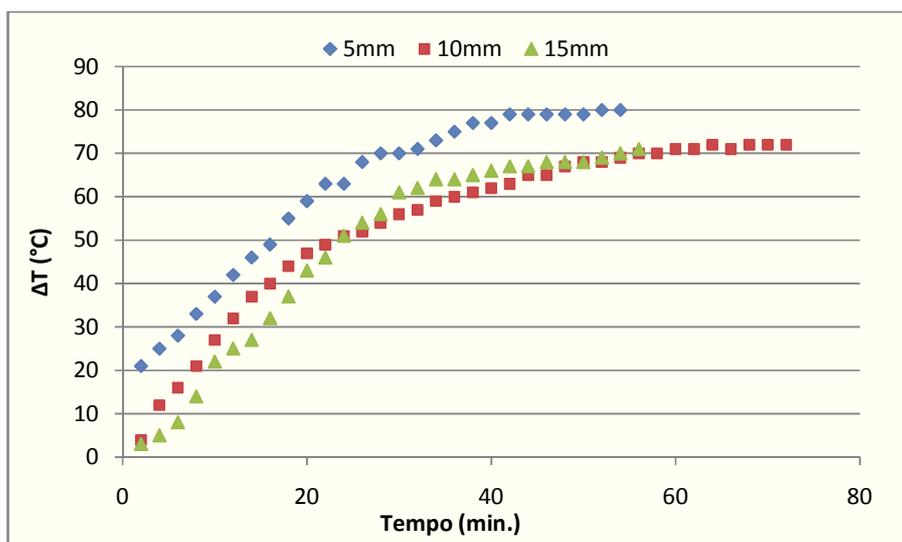


Figura 22 -  $\Delta T$  x Tempo para diferentes distâncias (d). (Fonte: Autor)

Analisando os dois gráficos verifica-se que para a distância de 5mm obtém-se a estabilização da diferença de temperatura primeiro e ainda com o maior valor, o que é de extrema importância para o desempenho do sistema de geração, sem atingir a temperatura limite informada pelo fabricante ( $180^{\circ}\text{C}$ ). Para distâncias maiores o  $\Delta T$  se torna cada vez menor, o que não é interessante para este trabalho. Desta forma, a distância a ser utilizada será de 5mm.

Após determinada a melhor distância foram feitos os ensaios de geração elétrica. Os resultados apresentam a média dos valores obtidos nos cinco ensaios realizados. O gráfico da Figura 23 apresenta a curva da tensão na carga em função da diferença de temperatura entre as faces quente e fria para os dois módulos conectados em série e com a carga resistiva conectada.

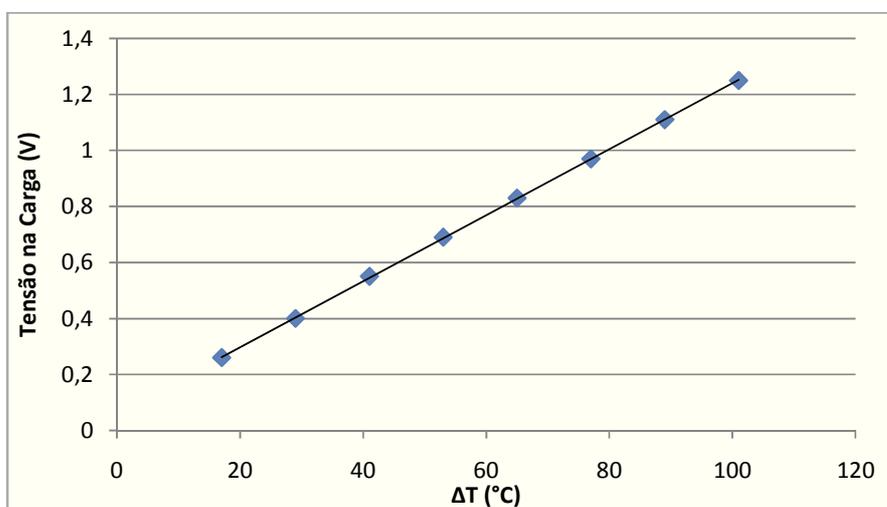
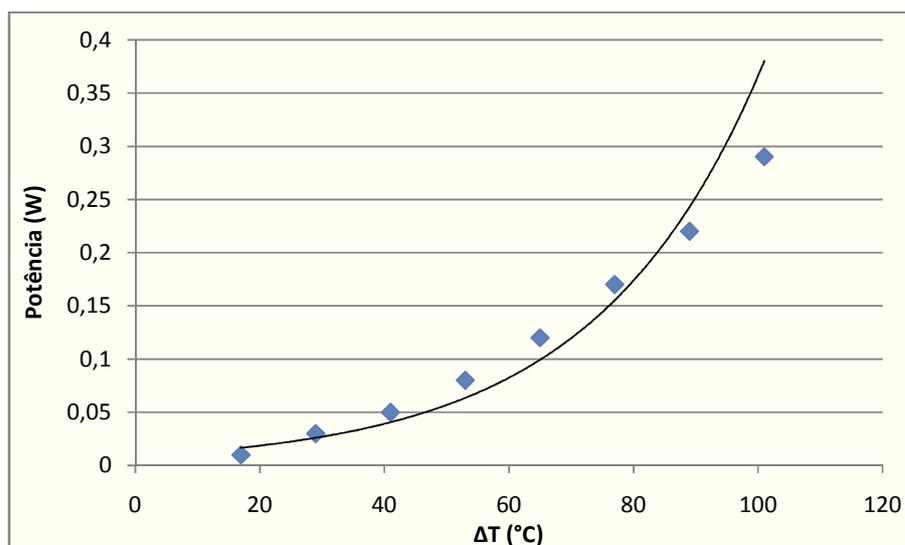


Figura 23 – Tensão na Carga x  $\Delta T$  para dois módulos conectados em série. (Fonte: Autor)

Os resultados comprovam que a tensão gerada é proporcional à diferença de temperatura entre as faces, conforme demonstrado pela Equação 13.

Uma das variáveis mais importantes nesse sistema é a potência elétrica que o sistema é capaz de fornecer à carga. Essa grandeza pode ser observada e analisada na Figura 24, cujas informações comprovam o modelamento apresentado nesse trabalho, ou seja, quanto maior for a diferença de temperatura entre os lados da placa, maior será a potência elétrica que o sistema será capaz de fornecer à carga. Pode-se comprovar a veracidade da Equação 20, a qual diz que para um valor de carga pré-estabelecido a potência de saída do sistema será diretamente proporcional ao quadrado diferença de temperatura, o que justifica uma curva exponencial.



**Figura 24 – Potência x  $\Delta T$  para dois módulos conectados em série. (Fonte: Autor)**

Com base na potência dissipada pela carga e o calor absorvido pelos módulos em função da diferença de temperatura e pelas características térmicas e geométricas dos mesmos, foi possível calcular o rendimento em função da diferença de temperatura, conforme definido por Phillips (2009). O gráfico da Figura 25 comprova a veracidade da Equação 28, que diz que o rendimento é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre as faces quente e fria.

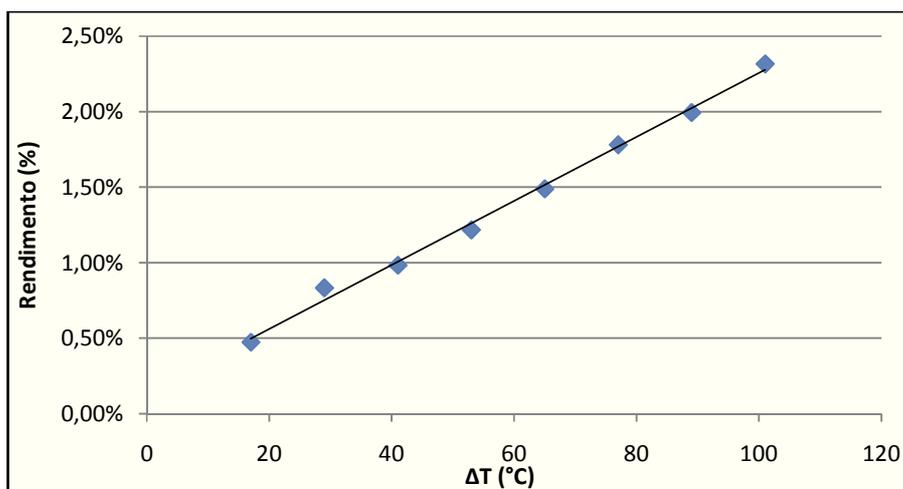


Figura 25 – Rendimento x  $\Delta T$  para dois módulos conectados em série. (Fonte: Autor)

De acordo com os resultados pode-se dizer que é possível aproveitar o calor de escape para geração de energia elétrica em um veículo movido a MCI. Porém, a tensão e potência geradas pelo sistema foram muito pequenas em função de terem sido utilizados apenas dois módulos termoelétricos conectados em série. Ao se aproveitar toda a superfície de um escapamento é possível utilizar uma quantidade maior de módulos e gerar uma quantidade de energia maior, capaz de alimentar diretamente pequenos equipamentos, como um GPS de 7,5 W.

Devido à demora de estabilização da diferença de temperatura, este sistema seria mais efetivo em veículos que rodam por mais tempo, como caminhões, no caso de alimentação direta de equipamentos. Mas também pode ser utilizado para auxiliar no carregamento da bateria de veículos que percorrem menores distâncias (alimentação indireta).

## **Capítulo 6 – Considerações Finais**

### **6.1 Conclusões**

Analisando os resultados obtidos, observou-se que os parâmetros mais importantes a serem observados e monitorados no sistema de geração de energia por conversão direta são: a temperatura do lado quente e do lado frio, e conseqüentemente o  $\Delta T$ , a tensão gerada (V) e a potência elétrica do circuito. Os resultados mostraram ainda a possibilidade de se utilizar a energia gerada para consumo do próprio veículo.

Com o desenvolvimento deste trabalho, conclui-se que a implementação de sistemas de geração de energia elétrica por conversão termoelétrica direta baseado em módulos termoelétricos para a recuperação de calor de exaustão dos automóveis é possível, e pode realmente ser uma solução para a geração de energia limpa, uma vez que utiliza apenas o calor gerado por um determinado processo e não apresenta nenhum tipo de resíduo.

No entanto, existem alguns problemas na utilização destes módulos que necessitam ser resolvidos, o primeiro deles é a limitação de temperatura a qual o módulo pode ser submetido. Isso é muito importante, pois os módulos encontrados hoje em dia não suportam altas temperaturas, o que passa a ser um problema, uma vez que os sistemas de exaustão geram gases com temperaturas elevadíssimas. No trabalho o problema foi contornado utilizando-se um suporte para separar os módulos do cano de escapamento.

Um segundo problema é o baixo rendimento apresentado pelo sistema de geração, que, associado ao primeiro problema, faz com que esta técnica de reaproveitar o calor de exaustão ainda seja pouco utilizada. Porém estes problemas tendem a diminuir com a evolução dos módulos termoelétricos.

### **6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros**

As ideias fundamentais desta dissertação foram apresentadas, implementadas, testadas e analisadas. Contudo, é possível explorar e desenvolver ainda mais a

solução encontrada. Sugere-se o aprofundamento dos estudos e algumas propostas de trabalhos futuros como:

- ✓ Montagem de modelo experimental utilizando o ambiente veicular, para confirmar resultados obtidos em bancada de testes.
- ✓ Elaboração de um modelo computacional que permita simular o comportamento dos geradores alterando-se os diversos parâmetros e configurações.
- ✓ Utilização de circuitos eletrônicos especiais, como conversores DC-DC, na saída do gerador para maximizar a energia gerada e minimizar os distúrbios elétricos.

## Referências

ALPHA's Next Generation Heat Sinks. Disponível em: <http://www.micforg.co.jp/en>. Acesso em 26 de abril de 2012.

ALVES, E. O., **Propriedades físicas do semicondutor  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$** . Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

ALVES, L. M., **Estudo da solidificação e do processamento cerâmico de ligas de silício-germânio para aplicações termoelétricas**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

ANTUNES, J. A. A., **Reaproveitamento de calor para geração de energia eléctrica no automóvel**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2011.

BÉLANGER, S.; GOSELIN, L., **Thermoelectric generator sandwiched in a crossflow heat exchanger with optimal connectivity between modules**. Energy Conversion and Management. v. 52, p. 2911-2918, 2011.

CAMARGO, J. R.; SANTOS, J. H.; CHAVES, C. A., **Experimental performance of thermoelectric modules applied to power generation**. 12<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences, Belo Horizonte, 2008.

CASANO, G.; PIVA, S., **Experimental investigation of the performance of a thermoelectric generator based on Peltier cells**. Experimental Thermal and Fluid Science. v. 35, p. 660-669, 2011.

CHAMPIER, D.; BÉDÉCARRATS, J.P.; KOUSKSOU, T.; RIVALETTO, M.; STRUB, F.; PIGNOLE, P., **Study of a TE (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove**. Energy. v. 36, p. 1518-1526, 2011.

FAIRBANKS, J., **Thermoelectric applications in vehicles status**. U.S. Department of Energy, Washington, EUA, 2008.

FAIRBANKS, J., **Vehicular applications of thermoelectric**. Diesel Engine-Efficiency and Emissions Research. DEER Conference, Dearborn, EUA, 2008.

FARIAS, S. R. A., **Protótipo de um microgerador termoelétrico de estado sólido: cogeração a gás**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

GEROVAC, N.; SNYDER, G. J.; CAILLAT, T., **Thermoelectric properties of n-type polycrystalline  $\text{Bi}_2\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$  alloys**. In: 21<sup>th</sup> International Conference on Thermoelectrics Proceedings, p. 31, Long Beach, EUA, 2002.

GONÇALVES, L. M., **Microsistema termoelétrico baseado em telureto de bismuto e antimônio**. Tese de Doutorado, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2008.

GOU, X.; XIAO, H.; YANG, S., **Modeling, experimental study and optimization on low-temperature waste heat thermoelectric generator system**. Applied Energy. v. 87, p. 3131–3136, 2010.

HSIAO, Y.Y.; CHANG, W.C.; CHEN, S. L., **A mathematic model of thermoelectric module with applications on waste heat recovery from automobile engine**. Energy. v. 35, p. 1447-1452, 2010.

HSU, C.; HUANG, G.; CHU, H.; YU, B.; YA, D., **Experiments and simulations on low-temperature waste heat arvesting system by thermoelectric power generators**. Applied Energy, v. 88, p. 1291-1297, 2011.

HUANG, G.; HSU, C.; CHU, H.; YU, B.; YA, D., **An effective Seebeck coefficient obtained by experimental results of a thermoelectric generator module**. Applied Energy, v. 88, p. 5173-5179, 2011.

IBRAHIM, E. A.; SZYBIST, J. P.; PARKS, J. E., **Enhancement of automotive exhaust heat recovery by thermoelectric devices**. Journal of Automobile Engineering, v. 224, p. 1097-1111, 2010.

INCROPERA, F. P.; DEWIIT, D. P.; BERGMAN, T. L.; VAVINE, A. S., **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6ª Edição, LTC, 2008.

JANG, B.; HAN, S.; KIM, J., **Optimal design for micro-thermoelectric generators using finite element analysis**. *Microelectronic Engineering*. v. 88, p. 775–778, 2011.

JONES, B. L.; JACKSON, K.; JAMES, A.; MELDRUM, D.; ROSE, M. C., **Powering sea-ice instrumentation via the Seebeck Effect**. *Cold Regions Science and Technology*, v.68, p. 60-67 2011.

KARRI, M. A.; THACHER, E. F.; HELENBROOK, B. T., **Exhaust energy conversion by thermoelectric generator: Two case studies**. *Energy Conversion and Management*, v. 52, p. 1596–1611, 2011.

KRYOTHERM – Production of Thermoelectric Modules. Disponível em: <http://www.kryotherm.ru/>. Acesso em 26 de abril de 2012.

LAVRIC, E. D., **Sensitivity analysis of thermoelectric module performance with respect to geometry**. *Chemical Engineering Transactions*. v. 21, p. 133-138, 2010.

LEE, P.; TSENG, S. C.; CHAO, L., **High-temperature thermoelectric properties of  $Ti_x(ZrHf)_{0.99-x}V_{0.01}Ni_{0.9}Pd_{0.1}Sn_{0.99}Sb_{0.01}$  half-Heusler alloys**. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 496, p. 620–623, 2010.

MENG, F.; CHEN, L.; SUN F. **A numerical model and comparative investigation of a thermoelectric generator with multi-irreversibilities**. *Energy*. v. 36, p. 3513–3522, 2011.

MUHTAROGLU, A.; YOKOCH, A.; JOUANNE, A., **Integration of thermoelectrics and photovoltaics as auxiliary power sources in mobile computing applications**. *Journal of Power Sources*. v. 177, p. 239–246, 2008.

NIU, X.; YU, J.; WANG, S., **Experimental study on low-temperature waste heat thermoelectric generator**. Journal of Power Sources. v. 188, p. 621-626, 2009.

OJHA, S., **CFD analysis on forced convection cooling of electronic chips**. Dissertação de Mestrado, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, Índia, 2009.

PALACIOS, R.; ARENAS, A.; PECHARROMÁN, R. R.; PAGOLA, F. L., **Analytical procedure to obtain internal parameters from performance curves of commercial thermoelectric modules**. Applied Thermal Engineering. v. 29, p. 3501–3505, 2009.

PHILLIPS, S. S., **Characterizing the thermal efficiency of thermoelectric modules**. Tese de Bacharelado, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, EUA, 2009.

RODRÍGUEZ; A.; VIÁN, J.G; ASTRAIN, D.; MARTÍNEZ, A., **Study of thermoelectric systems applied to electric power generation**. Energy Conversion and Management. v. 50, p. 1236-1246, 2009.

ROWE, D. M., **Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source**. International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, v. 1 p. 13-23, 2006.

SANTOS, I. M., **Protótipo de uma unidade com tri-geração de energia para utilizações remotas: aplicação de módulo semicondutivo gerador termoelétrico**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

SANTOS, L. P., **Análise de desempenho de um gerador termoelétrico baseado no efeito Seebeck**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2010.

SARK, W. G. J. H. M. van., **Feasibility of photovoltaic – Thermoelectric hybrid modules**. Applied Energy, v. 88, p. 2785-2790, 2011.

SILVA, R. E., **Análise e Otimização de um Sistema Termoelétrico para Condicionamento de Ar**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2010.

SINGH, R.; TUNDEE, S.; AKBARZADEH, A., **Electric power generation from solar pond using combined thermosyphon and thermoelectric modules**. Solar Energy. v. 85, p. 371–378, 2011.

SOUZA, D. H. C. de., **Otimização do uso de refrigeradores termoelétricos em processos de refrigeração**. Monografia de Graduação, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

STRAZZA, F.; RIBERI, R., **Projeto de uma micro-adeega climatizada de baixo custo**. Monografia de Graduação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

TE Technology. Disponível em: [http://www\\_tetech.com](http://www_tetech.com). Acesso em 12 de outubro de 2012.

VÁZQUEZ, J.; SANZ-BOBI, M. A.; PALACIOS, R.; ARENAS, A., **State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles**. Proceedings of the 7<sup>th</sup> European Workshop on Thermoelectrics, Pamplona, SPAIN, 2002.

YANG, J., **Thermoelectric technology for automotive waste heat recovery**. GM Research & Development Center. DEER Conference. Detroit, EUA, 2007.

YU, C.; CHAU, K.T., **Thermoelectric automotive waste heat energy recovery using maximum power point tracking**. Energy Conversion and Management, v. 50, p. 1506–1512, 2009.

ZHANG, X.; CHAU, K. T.; CHAN C. C., **Overview of Thermoelectric Generation for Hybrid Vehicles**. Journal of Asian Electric Vehicles. v. 6, p. 1119-1124, 2008.